



Andrzej Smolarz

Diagnostyka procesów spalania paliw
gazowych, pyłu węglowego oraz
mieszaniny pyłu węglowego i biomasy
z wykorzystaniem metod optycznych

MONOGRAFIE

Diagnostyka procesów spalania paliw
gazowych, pyłu węglowego oraz
mieszaniny pyłu węglowego i biomasy
z wykorzystaniem metod optycznych

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Andrzej Smolarz

Diagnostyka procesów spalania paliw
gazowych, pyłu węglowego oraz
mieszaniny pyłu węglowego i biomasy
z wykorzystaniem metod optycznych



Politechnika Lubelska
Lublin 2013

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Łukasik

Redakcja i skład: Andrzej Smolarz

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-78-5

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Diagnostyka techniczna	11
2.1. Istota i znaczenie diagnostyki technicznej	11
2.2. Metody diagnostyki procesów przemysłowych	12
2.3. Cele diagnostyki procesu spalania	15
3. Spalanie w energetyce	17
3.1. Ogólna charakterystyka procesu spalania	17
3.2. Spalanie gazu	19
3.2.1. Fizykochemia spalania gazu	19
3.2.2. Przemysłowe technologie spalania gazu	22
3.3. Spalanie węgla	25
3.3.1. Pochodzenie i charakterystyka węgla	25
3.3.2. Spalanie pojedynczego ziarna węgla	26
3.3.3. Przemysłowe technologie spalania węgla	28
3.4. Spalanie biomasy	30
3.4.1. Spalanie drewna i słomy	30
3.4.2. Współspalanie biomasy z węglem	31
3.5. Środowiskowe aspekty spalania	32
3.6. Niskoemisyjne techniki spalania	34
3.7. Współczesne problemy technologii spalania	37
3.8. Numeryczne modelowanie spalania	39
4. Optyczne metody pomiarowe procesu spalania	40
4.1. Płomień jako źródło promieniowania	41
4.2. Chemiluminescencja	42
4.3. Promieniowanie cząstek stałych	51
4.4. Promieniowanie gorących gazów	53
5. Metody analizy danych	55
5.1. Analiza składowych głównych	55
5.2. Sztuczne sieci neuronowe	58
5.2.1. Perceptron	58
5.2.2. Klasyfikatory Kohonena	60
5.3. Logika rozmyta	62

5.4. Sztuczne systemy immunologiczne.....	64
5.4.1. Algorytm selekcji negatywnej	65
5.4.2. Algorytm selekcji klonalnej.....	66
5.4.3. Algorytm negatywnej selekcji klonalnej.....	67
6. Diagnostyka płomienia	69
6.1. Diagnostyka płomienia gazowego.....	70
6.1.1. Niestabilność procesu spalania	70
6.1.2. Klasyfikacja rodzaju płomienia	73
6.1.3. Stechiometria spalania	75
6.2. Diagnostyka płomienia pyłowego przy spalaniu węgla i współspalaniu z biomasą.....	82
6.2.1. Światłowodowy układ monitorowania płomienia	82
6.2.2. Badania wstępne – dostosowanie sondy do palnika i kotła.....	84
6.2.3. Stanowisko laboratoryjne	86
6.2.4. Metodyka pomiarów	89
6.2.5. Wyniki pomiarów	90
6.2.6. Przetwarzanie wstępne	92
6.2.7. Redukcja liczby cech sygnału płomienia za pomocą analizy składowych głównych.....	94
6.2.8. Analiza ortogonalności	96
6.2.9. Klasyfikacja z użyciem rozmytych sieci neuronowych (Diagnostyka spalania pyłu węglowego)	98
6.2.10. Diagnostyka spalania mieszaniny pyłu węglowego i biomasy	99
6.2.11. Klasyfikacja z użyciem algorytmów immunologicznych (Diagnostyka spalania pyłu węglowego)	101
6.2.12. Wykrywanie odrywania się płomienia od wieńca palnika wirowego.....	104
6.2.13. Położenie strefy zapłonu płomienia w palniku strumieniowym	105
7. Podsumowanie i wnioski	107
8. Bibliografia.....	110

1. Wstęp

Spalanie paliw kopalnych jest i w najbliższej przyszłości będzie najważniejszym źródłem wytwarzanej energii wykorzystywanej przez człowieka. Węgiel wciąż jest kluczowym światowym surowcem energetycznym i ocenia się, że w horyzoncie czasowym około 50 lat będzie miał nadal dominującą pozycję. W Polsce węgiel jest źródłem ponad 90% (2006) produkowanej energii elektrycznej [1]. Niestety, taki sposób wytwarzania energii wiąże się z postępującym zanieczyszczeniem środowiska w postaci uwalnianych do atmosfery wielkich ilości gazów spalinowych i pyłów [2].

Gaz ziemny, zwłaszcza w perspektywie wykorzystania złóż gazu łupkowego występującego na terenie Polski, wydaje się być drugim, co do wielkości wykorzystania, paliwem w naszym kraju. Jego spalanie powoduje mniejsze jednostkową emisję ditlenku węgla niż w przypadku węgla kamiennego, jak i brunatnego.

Pomimo znacznego wzrostu liczby publikacji poddających w wątpliwość związek ocieplenia klimatu z ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla w atmosferze [3, 4], aktualne trendy w gospodarce Unii Europejskiej wymuszają ograniczenie jego emisji, narzucając wysokie wymagania m.in. na energetykę. Spełnienie tych wymagań jest trudne i bardzo kosztowne. Nie ulega jednak wątpliwości, że 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.

We współczesnych złożonych systemach energetycznych praca bloku energetycznego wymaga czynnej pierwotnej i wtórnej regulacji częstotliwości oraz mocy (ARCM), dla spełnienia wymagań Krajowej Dyspozycji Mocy i Union for the Co-ordination of Production and Transmission of Electricity (UCPTE). Wymusza to ciągłe zmiany (w założonym paśmie regulacyjnym), co 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. Prowadzenie procesu spalania, który jednocześnie spełnia wymagania KDM, UCPTE oraz ochrony środowiska jest zadaniem niezmiernie trudnym.

W ostatnich latach głównym problemem jest ograniczenie emisji dwutlenku siarki i tlenków azotu. Badania i analizy procesu spalania w kotle energetycznym doprowadziły do opracowania technologii będących kompromisem pomiędzy kosztami wdrożenia a efektywnością. W przypadku SO_2 są to przede wszystkim metody wtórne redukujące już powstałe zanieczyszczenia. Ograniczenia emisji tlenków azotu (NO_x), przy nie zwiększaniu emisji tlenu węgla (CO), osiągane jest metodami pierwotnymi poprzez odpowiednią organizację procesu. Nie dają one wprawdzie tak

radikalnego zmniejszenia emisji NO_x jak metody katalityczne, ale wymagają 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 (O₂) w spalinach. Regulacja ta niestety nie zapewnia uzyskania odpowiednich chwilowych wartości parametrów, chociaż w wartościach średnich może dawać pozornie zadowalające rezultaty. Taki sposób regulacji w pewnych warunkach skutkuje obniżeniem 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 w kotłach energetycznych, wyposażonych zazwyczaj w kilkanaście palników naściennych, narożnych, bądź pracujących w układzie tangencjalnym [5]. Proces spalania optymalizowany jest dla całego kotła, pod kątem uzyskania pożądanego rozkładu temperatur oraz właściwego stosunku powietrze-paliwo. Bardzo często nie ma możliwości sterowania każdego palnika z osobna. Rozdział mieszanki pyłowo-powietrznej pomiędzy poszczególne palniki nie jest 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 znacznie zwiększoną emisję NO_x i CO w układach wielopalnikowych [6].

W konwencjonalnych układach automatyki i sterowania procesem spalania w kotłach wielopalnikowych, sygnałami wejściowymi są zazwyczaj wydatki paliwa i powietrza (lub tlenu) oraz uśredniona zawartość tlenu 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 dodatkowo znacznie opóźnione [6, 7].

Mimo wprowadzenia sterowania cyfrowego wykorzystującego zmienne procesowe i opóźnione oraz uśrednione stężenia wybranych gazów w spalinach, z trudnością są spełniane obowiązujące obecnie normy emisji gazów (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 lipca 2001r.). Dyrektywy unijne, zaostrzające normy emisyjne, są wprowadzane od 2008 roku, a staną się w pełni obowiązujące po 2013 roku. Powodują one konieczność zmian aktualnie stosowanych systemów sterowania, które powinny zostać uzupełnione o efektywne układy diagnostyczne. Konieczność spełnienia tych ostrych wymagań spowodowało utworzenie szeregu programów badawczych, realizowanych przede wszystkim w Unii Europejskiej. Obecnie efektywny sposób prowadzenia procesu spalania powinien uwzględniać nie tylko koszty związane z procesem technologicznym lecz także koszty związane z emisją

zanieczyszczeń. Wymaga to stosowania nowoczesnych rozwiązań technicznych, które pozwoliłyby na utrzymywanie procesu spalania w optymalnych warunkach. Stosowane są m.in. algorytmy sztucznej inteligencji. Systemy eksperckie służą przede wszystkim do modelowania [8, 9, 10], ale również do diagnostyki [11]. Klasyczne sieci neuronowe zostały użyte do monitorowania emisji zanieczyszczeń z małych kotłów [12], a także predykcji emisji gazów kotła rusztowego [13, 14, 15], podobnie jak sieci GMDH (ang. *Group Method of Data Handling*) [16, 17]. Sieci rozmyte zastosowano w systemie do estymacji i minimalizacji emisji NO_x w kotle pyłowym [18, 19]. Praca [20] zawiera porównanie metod estymacji emisji NO_x z tangencjalnego kotła pyłowego 300MW za pomocą algorytmów genetycznych, metody roju cząstek i metodami optymalizacji kombinatorycznej. Wszystkie wymienione systemy mają jedną podstawową wadę – wykorzystywane są pomiary procesowe uśrednione dla całego kotła i opóźnione. W kotłach energetycznych pracuje od kilkunastu do kilkudziesięciu palników a pomiar składu chemicznego gazów najczęściej dokonywany jest za pomocą analizatorów gazowych umieszczonych za obrotowymi podgrzewaczami powietrza. W zależności od wielkości kotła i warunków pracy informacja może być opóźniona nawet do kilku minut, co powoduje, że diagnostyka i sterowanie są często za mało efektywne. Nawet najbardziej złożone systemy nie umożliwiają regulacji pojedynczego palnika, a to indywidualny nadmiar powietrza decyduje o ilości NO_x generowanych w kotle węglowym [21]. W diagnostyce możliwe jest wykrycie nieprawidłowej pracy, ale lokalizacja uszkodzenia jest utrudniona lub wręcz niemożliwa. Analiza problemu wskazuje na brak dostępnych metod bezpośredniego pomiaru parametrów wskazujących na jakość zachodzącego procesu spalania w obrębie pojedynczego palnika pracującego w zespole. Konieczne jest zatem wykorzystanie metod pośrednich, do których można zaliczyć przede wszystkim metody akustyczne [22, 23, 24, 25, 26] oraz optyczne. Wspomniane metody są bezinwazyjne i pozwalają na otrzymanie praktycznie nieopóźnionej i dodatkowo selektywnej przestrzennie informacji o zachodzącym procesie spalania. Ważne jest również, aby te metody zapewniały poprawne działanie w warunkach przemysłowych tzn. wysokiej temperatury, zapylenia i wibracji. Wiele spośród nich wykorzystuje płomień, jako źródło informacji o procesie spalania. Emitowane przez płomień 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. Wykorzystuje się promieniowanie w zakresie od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni [25, 26].

Przykładem praktycznego zastosowania optycznych metod diagnostycznych mogą być czujniki zaniku płomienia. Zdecydowana większość spotykanych rozwiązań, wykorzystuje tylko informację zawartą w intensywności świecenia płomienia [27, 28, 29], np. rozwiązania firm: BFI Automation, Durag, Fireye, czy Land. Zasadniczym problemem, który pojawia się podczas ich eksploatacji

jest nieuniknione zabrudzenia układu optycznego. Dlatego konieczne staje się właściwe zaprojektowanie urządzenia, odbierającego sygnał optyczny pochodzący z płomienia (głowica pomiarowa) tak, by do minimum ograniczyć możliwość zabrudzenia [30, 31].

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 obecnie stosowanych rozwiązań wykorzystuje informację związaną z pulsowaniem (migotaniem) płomienia, co wiąże się z koniecznością analizy składowej zmiennej sygnału uzyskanego z fotodetektora. Do tego celu wykorzystuje się częstotliwościowe i czasowo-częstotliwościowe metody analizy sygnałów – transformatę Fouriera, krótkoczasową transformatę Fouriera, transformatę falkową [32, 26], metody prognozowania szeregów czasowych z wykorzystaniem modeli ARIMA [33] oraz analizy wykorzystujące algorytmy sztucznej inteligencji [18, 34, 35, 36].

Zaawansowana analiza sygnału fotodetektora pozwala na zastosowanie skanerów płomienia do diagnostyki procesu spalania nie ograniczającej się tylko do detekcji zaniku płomienia [37], ale także pozwalającej na detekcję zmian przebiegu procesu spalania w obrębie pojedynczego palnika [38, 39], zwłaszcza ze względu na emisję NO_x . Oprócz skanerów jednostrefowych, istnieją również skanery wielostrefowe, które dzięki odpowiednio zaprojektowanemu układowi optycznemu, pozwalają na pomiar parametrów płomienia jednocześnie w kilku jego strefach [27, 42]. Rozszerza to możliwości diagnostyczne urządzenia, np. o możliwość śledzenia odsuwania się płomienia od palnika [41]. Do diagnostyki procesu spalania można również wykorzystać przetwarzanie obrazu płomienia [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53]. Obserwacja płomienia pyłowego w różnych zakresach widmowych została użyta do diagnostyki stanu polegającej na wykrywaniu rodzaju spalanego paliwa [54, 55, 56] będąc alternatywą dla metod radiometrycznych lub mikrofalowych [57].

Niniejsza monografia poświęcona jest metodom diagnostyki procesu spalania paliw zasilających turbiny gazowe i kotły pyłowe. Przedstawione zostaną w niej metody mające zastosowanie zarówno przy spalaniu paliw kopalnych (gaz ziemny, węgiel), jak i paliw alternatywnych (biogaz, gaz syntezowy, biomasa współspalana z pyłem węglowym). Omówione zostaną problemy, na jakie napotyka diagnostyka spalania tych paliw oraz propozycje ich rozwiązania. Dla pełnego przedstawienia zadania stojącego przed diagnostyką omówione zostaną procesy spalania gazu, węgla i biomasy oraz współspalania węgla i biomasy, optyczne metody pomiarowe parametrów tych procesów, metody analizy pomiarów oraz charakterystyka płomienia, który pozwala na wykorzystanie najszybszych informacji charakteryzujących proces spalania.

2. Diagnostyka techniczna

2.1. Istota i znaczenie diagnostyki technicznej

Do niedawna, pochodzący z greki termin diagnostyka (gr. *diagnostikós* – umiemy rozpoznawać, *diagnōsis* – wyróżnianie, diagnoza, decyzja), był używany tylko w medycynie i oznaczał rozpoznanie choroby. Z czasem, w miarę wzrostu złożoności stosowanych środków technicznych i konieczności zapewnienia ich niezawodnego działania, termin diagnostyka został rozszerzony na urządzenia techniczne. W ten sposób powstała tzw. diagnostyka techniczna. Obszar zainteresowania diagnostyki technicznej początkowo ograniczał się do urządzeń mechanicznych. W miarę rozwoju techniki był poszerzany o urządzenia elektryczne, układy elektroniczne, a ostatnio także o procesy technologiczne i układy sterowania [53].

Diagnostyka procesów przemysłowych nabiera szczególnego znaczenia w przypadku instalacji technologicznych cechujących się dużym stopniem złożoności, spotykanych np. w energetyce, czy przemyśle chemicznym, dla których aspekt niezawodności ma fundamentalne znaczenie dla ekonomii i bezpieczeństwa. Diagnostyka procesów przemysłowych 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 [53]. Zdefiniowane w ten sposób diagnozowanie traktowane jest jako wykrywanie i rozróżnianie uszkodzeń obiektu na podstawie analizy zebranych i odpowiednio przetworzonych sygnałów diagnostycznych. Sygnały diagnostyczne są dowolnymi wielkościami będącymi nośnikiem informacji o stanie obiektu diagnozowania.

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 w sposób automatyczny 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. W sytuacjach awaryjnych pojawia się jednocześnie wiele różnych alarmów. Ich interpretacja może stanowić dla operatora poważny problem na skutek przeciążenia informacyjnego a także stresu. Błędy operatorskie w takich okolicznościach mogą prowadzić do dalszego pogorszenia sytuacji i w konsekwencji do poważnej awarii. 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 zniszczenia instalacji, czy 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. Poprawna diagnostyka pozwala na uniknięcie niepotrzebnego demontażu urządzeń sprawnie działających.

Praktycznie w każdym procesie technologicznym występują newralgiczne ognia, które narażone są szczególnie na oddziaływanie wszelkiego rodzaju zagrożeń technologicznych. Co więcej, często wymagania i ograniczenia występujące przy spełnianiu różnych kryteriów (np. ekonomicznych, środowiskowych, technologicznych) są ze sobą sprzeczne. W procesie produkcji energii elektrycznej w elektrowniach z turbiną gazową jednym z takich newralgicznych ogniw jest komora spalania. W zależności od konstrukcji turbiny komora może być jedna (układ silosowy) lub nawet kilkanaście. Wciąż zaostrzające się wymagania stawiane turbinom powodują konieczność wyposażenia ich w układy monitorujące i diagnostyczne [54].

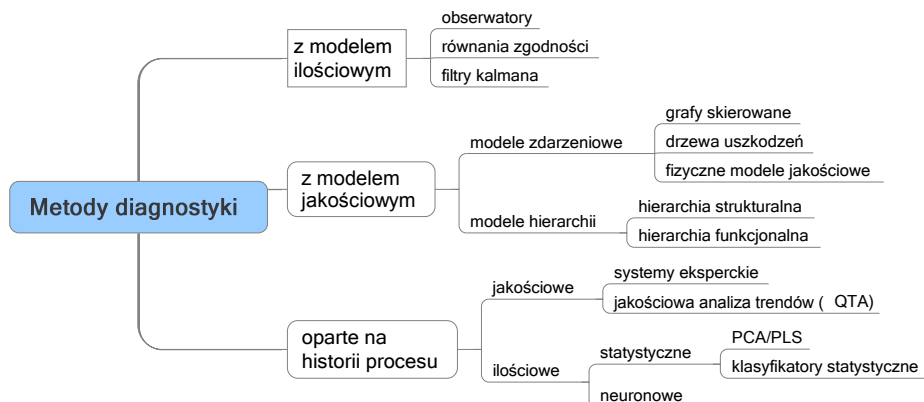
W procesie produkcji energii elektrycznej w elektrowniach węglowych jednym z takich newralgicznych ogniw jest kocioł. Pierwotnym źródłem energii jest węgiel najczęściej spalany w palniku pyłowym. W zależności od mocy i konstrukcji kotła takich palników może być nawet kilkadziesiąt. Dla prawidłowej oceny 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 [55, 56].

2.2. Metody diagnostyki procesów przemysłowych

Diagnostyka procesu przemysłowego dokonywana jest na podstawie analizy stanu, w jakim on się znajduje. Stan procesu technologicznego definiowany jest jako zbiór ocen odchyłeń rozpatrywanego stanu od stanu uznawanego za referencyjny [53]. Ogólna klasyfikacja metod diagnostycznych [57] pokazana jest na rys. 2.1.

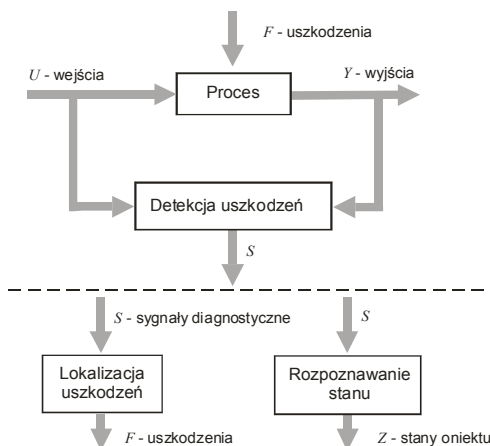
W procesie diagnostycznym można wyróżnić trzy fazy [58]:

- detekcja,
- lokalizacja,
- identyfikacja uszkodzeń.



Rys. 2.1. Ogólny podział metod diagnostycznych [57]

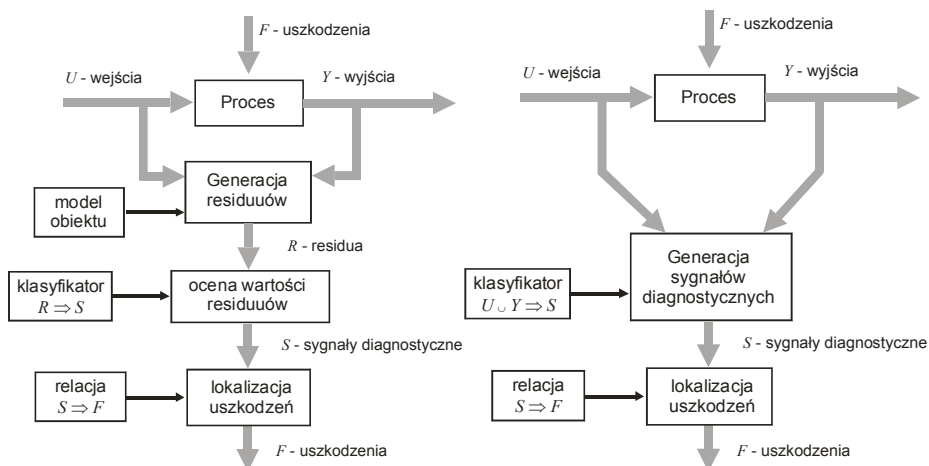
Najczęściej, proces diagnostyczny bywa ograniczony do dwóch pierwszych faz. W fazie detekcji, w wyniku przetwarzania zmiennych procesowych, wykrywane są symptomy uszkodzeń. Na ich podstawie, w fazie lokalizacji wskazywane są zaistniałe uszkodzenia. Identyfikacja uszkodzenia polega na określeniu jego rozmiaru i ewentualnej zmienności w czasie. Czasami zamiast fazy lokalizacji uszkodzeń występuje faza rozpoznawania stanu obiektu lub klasy stanów (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Schemat diagnostyki procesu obejmującej fazę detekcji uszkodzeń i fazę lokalizacji lub rozpoznawania stanu obiektu [53]

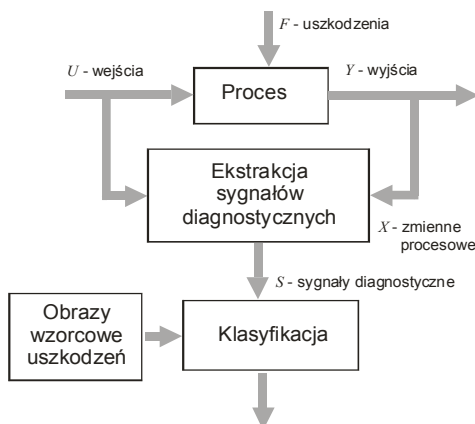
Istnieje wiele sposobów realizowania procesu diagnostycznego. Może on odbyć się z wykorzystaniem modelu matematycznego, który może mieć postać analityczną, neuronową, rozmytą bądź bez modelu procesu. Schemat diagnostyki procesu obejmujący fazę detekcji i lokalizacji z użyciem modelu procesu został przedstawiony na rys. 2.3a. 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 model procesu jest nie dość dokładny lub zbyt złożony. Stosuje się wtedy diagnozowanie z detekcją bez użycia modelu, jak to pokazano na rys. 2.3b. W takim przypadku stosowane są metody kontroli ograniczeń lub kontroli związków występujących między zmiennymi procesowymi [53].



Rys. 2.3. Schemat diagnostyki procesu: a) z użyciem modelu procesu, b) bez stosowania modelu procesu [53, 59]

Inny sposób diagnostyki procesów wykorzystuje ciągłe 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 [53].



Rys. 2.4. Schemat diagnostyki procesu rozumianej jako rozpoznawanie wzorców [53]

Diagnozowanie procesu może być również traktowane jako rozpoznawanie wzorców. W takim przypadku w fazie detekcji uszkodzeń następuje ekstrakcja symptomów, a w fazie lokalizacji uszkodzeń dokonuje się klasyfikacji uszkodzeń lub stanu obiektu. Schemat diagnostyki procesu w takim ujęciu zaprezentowany został na rys. 2.4.

Przy złożonych procesach, np. procesie spalania, w zależności od wielkości obiektu i potrzeb, stosowane są modyfikacje schematów przedstawionych na rys. 2.3b i rys. 2.4.

2.3. Cele diagnostyki procesu spalania

Metody diagnostyki procesów przemysłowych, których zadaniem jest wczesne wykrycie symptomów powstawania sytuacji awaryjnej, nabierają szczególnego znaczenia w przypadku procesów złożonych, o wielkiej skali. Do takich procesów zalicza się proces produkcji energii elektrycznej. Jak już wcześniej wspomniano, w wielu procesach przemysłowych występują newralgiczne węzły, w tym przypadku jest to m.in. kocioł lub turbina gazowa. Zachodzące w nich procesy spalania determinują z jednej strony parametry procesowe wytwarzania energii oraz ich ekonomikę, a z drugiej decydują o zanieczyszczeniu środowiska naturalnego. Wymagania i ograniczenia występujące przy spełnianiu różnych kryteriów (np. ekonomicznych, środowiskowych, technologicznych) są ze sobą najczęściej w sprzeczności, należy więc uzyskać kompromis pozwalający na realizację procesu bez zagrożenia uszkodzeniem bądź destrukcją 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.

W przypadku turbin gazowych zaawansowanie metod oceny jakości spalania jest znacznie większe, jednakże dynamika procesu jest znacznie szybsza, poza tym występują potencjalnie niebezpieczne zjawiska nie mające miejsca w przypadku kotłów pyłowych, np. rezonans akustyczny.

Stosunkowo nowym problemem spalania jest użycie tzw. paliw alternatywnych – biomasy jako dodatku do pyłu węglowego czy też gazu fermentacyjnego lub gazu syntezowego do spalania w turbinach gazowych.

Zastosowanie tych paliw w istotny sposób modyfikuje proces spalania w urządzeniach przemysłowych, dodatkowo paliwa te charakteryzują się dużą zmiennością składu. Dotychczas opracowane metody diagnostyki dla paliw „konwencjonalnych” muszą ulec znacznej modyfikacji lub wręcz nie mogą być stosowane, stąd konieczność opracowania nowych, spełniających wymagania współczesnej energetyki.

3. Spalanie w energetyce

Procesy spalania pełnią fundamentalną rolę w rozwoju przemysłu, którego historia liczy już ponad 200 lat. Powyżej 90% obecnie zużywanej energii pochodzi ze spalania paliw, w zdecydowanej większości – paliw kopalnych. Przewiduje się, że w najbliższej przyszłości nadal będzie to główne źródło energii, pomimo stopniowego upowszechniania się innych źródeł energii, np.: reakcje jądrowe, Słońce, wiatr, pływy morskie, biomasa, itp. Źródła te przez długi jeszcze czas będą traktowane jako alternatywne.

Aby proces diagnostyki spalania pyłu węglowego uczynić bardziej zrozumiałym, w dalszej kolejności przedstawione zostaną najważniejsze informacje dotyczące właściwości paliw. Ze względu na zastosowanie opisywanych metod monitorowania i diagnostyki opis ograniczony będzie do spalania gazu w przemysłowych turbinach gazowych oraz spalania węgla w kotłach energetycznych z palnikami pyłowymi. Szersze ujęcie zagadnień związanych ze spalaniem można znaleźć w monografiach poświęconych wyłącznie temu zagadnieniu, np. [60, 61, 5, 62].

3.1. Ogólna charakterystyka procesu spalania

Spalanie to reakcja chemiczna przebiegająca między paliwem a utleniaczem, z wydzieleniem ciepła i światła [62]. Zarówno paliwa, jak i utleniacze mogą występować w trzech stanach skupienia: gazowym, ciekłym i stałym. Powszechnie dostępnym utleniaczem gazowym jest tlen zawarty w powietrzu. Spalanie często jest kojarzone z występowaniem płomienia, który można zdefiniować jako egzotermiczną reakcję o charakterze łańcuchowym, przemieszczającą się w przestrzeni z prędkością poddźwiękową [61]. 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.

Reakcja spalania może być zapoczątkowana przez zapłon tzn. punktowy bodziec energetyczny, samozapłon – ciągły bodziec energetyczny lub samozapalenie na skutek przemian zachodzących w samym materiale na drodze fizycznej i chemicznej. W zależności od stanu skupienia komponentów wchodzących w skład mieszaniny substancji spalanej i utleniacza, bezpośrednio w strefie przebiegu reakcji chemicznych, rozróżnia się dwa rodzaje spalania:

- w układzie homogenicznym, kiedy substraty znajdują się w jednej fazie;
- w układzie heterogenicznym, kiedy substraty są w różnych stanach skupienia;

- homogeniczno-heterogeniczne – najczęściej występujące spalanie przejściowe, przykładem takiego surowca jest węgiel kamienny.

W zależności od sposobu wymieszania paliwa z powietrzem wyróżnia się:

- spalanie dyfuzyjne (ang. *diffusion*) – przy braku wstępnego wymieszania paliwa z powietrzem, tak spalają się ciała stałe, ciecze swobodnie parujące, czyste gazy na końcu palnika;
- spalanie kinetyczne (ang. *premixed, kinetic*) – spalanie homogenicznej mieszaniny paliwa z powietrzem, lub w przypadku pseudohomogenicznej mieszaniny np. pyłu ciała stałego lub mgły cieczy w powietrzu.

Spalanie można również podzielić na całkowite i niecałkowite. Spalanie całkowite ma miejsce, gdy cała masa spalanej substancji ulegnie utlenieniu. Występuje ono wtedy, gdy nie tylko nie ma dymu czy palnych substancji w popiele, ale i nie ulatnia się część paliwa w postaci pary. Spalanie całkowite zachodzi w wyniku reakcji tlenu z substancją, gdy ilość tlenu jest nie mniejsza niż wynikająca ze stechiometrii. Spalanie niecałkowite ma miejsce, gdy niecała masa spalanej substancji ulegnie utlenieniu. Występuje ono wtedy, gdy część substancji spalanej nie utleni się, lecz pozostanie w postaci sadzy, dymu, czy popiołu. Zdarza się to przy niedostatecznym dostępie tlenu do spalanej substancji a także przesypem lub unoszeniem przez spaliny lotnego koksiku.

Spalanie zupełne to spalanie, którego produktem jest najtrwalszy z możliwych do uzyskania w danej reakcji związek chemiczny, np. $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Spalanie niezupełne zachodzi w sytuacji, gdy substancja nie może z jakichś powodów (np. niedobór tlenu, słabe wymieszanie) utlenić się do końca, np.: $2C + O_2 \rightarrow 2CO$. O tym czy spalanie będzie zupełne czy niezupełne decyduje m.in. współczynnik nadmiaru powietrza.

Współczynnik nadmiaru powietrza (ang. *air-fuel equivalence ratio*) to stosunek rzeczywistej ilości (masy) powietrza, w której spalane jest paliwo, do ilości potrzebnej do całkowitego spalania paliwa (ilość stechiometryczna). Oznaczany jest zazwyczaj jako λ . Wzór definicyjny:

$$\lambda = \frac{L_r}{L_t}, \quad (3.1)$$

gdzie L_r to rzeczywista masa suchego powietrza, w którym następuje spalanie paliwa, a L_t oznacza teoretyczne zapotrzebowanie na suche powietrze.

Stechiometryczną (teoretyczną) ilość powietrza można obliczyć na podstawie analizy równań reakcji chemicznych zachodzących podczas spalania określonego paliwa. Jeśli powietrza wykorzystywanego do spalania jest więcej od ilości stechiometrycznej, to współczynnik nadmiaru powietrza λ jest większy od 1 (spalanie w warunkach ubogich), jeśli mniej, to $\lambda < 1$ (spalanie w warunkach bogatych).

W celu uzyskania całkowitego spalania konieczne jest zwykle doprowadzenie większej ilości powietrza, niż to wynika z równań

stechiometrycznych. Dotyczy to szczególnie paliw stałych (np. pył węglowy). Jeśli spalane jest paliwo gazowe lub dobrze odparowane paliwa ciekłe, to ilość powietrza konieczna do uzyskania całkowitego spalania jest niewiele większa od stochiometrycznej.

W literaturze zagranicznej częściej spotyka się współczynnik ekwiwalencji (ang. *fuel-air equivalence ratio*). Jest to stosunek rzeczywistej ilości (masy) paliwa, spalanego w danej ilości powietrza, do ilości potrzebnej do spalania całkowitego (ilość stochiometryczna). Oznaczany jest zazwyczaj jako ϕ lub E.R. Wzór definicyjny:

$$\phi = \frac{m_p/m_u}{(m_p/m_u)_{st}}, \quad (3.2)$$

gdzie m_p , m_u oznacza odpowiednio masę paliwa i masę utleniacza, indeks st oznacza ilość stochiometryczną.

Pomiędzy współczynnikiem nadmiaru powietrza a współczynnikiem ekwiwalencji zachodzi związek:

$$\phi = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.3)$$

Spalanie w warunkach stochiometrycznych zachodzi wtedy, gdy $\lambda = \phi = 1$, jeśli powietrza wykorzystywanego do spalania jest więcej od ilości stochiometrycznej, to współczynnik ekwiwalencji ϕ jest mniejszy od 1 (spalanie w warunkach ubogich), jeśli mniej, to $\phi > 1$ (spalanie w warunkach bogatych).

3.2. Spalanie gazu

Spalaniu paliw gazowych poświęcono w całości kilka monografii, np. [63, 64], a praktycznie w każdej monografii poświęconej problemom spalania wyodrębnia się rozdziały o spalaniu gazów [5, 60, 65, 66].

3.2.1. Fizykochemia spalania gazu

Reakcja spalania może być zapoczątkowana przez zapłon wymuszony lub samozapłon. Istnieją jednakże granice, w których zapłon może nastąpić. Wynikają one z kinetyki reakcji – zapłon nie nastąpi jeżeli prędkość wypływu mieszanki gazów będzie na tyle duża, że gazy zostaną schłodzone poniżej temperatury zapłonu. Istnieją również określone granice stężeniowe, poza którymi zapłon nie nastąpi w żadnych warunkach. Jeśli w mieszaninie palnej udział paliwa jest mały, to ilość ciepła wydzielającego się z reakcji nie jest w stanie doprowadzić sąsiedniej warstwy do temperatury zapłonu – nie dojdzie do propagacji płomienia. Podobny mechanizm zachodzi przy małej ilości utleniacza. Tym dwóm przypadkom odpowiada dolna i górna granica zapłonu. Przykładowo dla metanu granice te wynoszą odpowiednio 5% i 15% metanu

w powietrzu. Stężeniowe granice zapłonu zależą od ciśnienia i dla malejących jego wartości zbliżają się na ogół do siebie osiągając tzw. minimalne ciśnienie zapłonu, poniżej którego zapłon jest niemożliwy. Wzrost temperatury rozszerza granice zapłonu, natomiast rozcieńczenie mieszaniny palnej obojętnymi składnikami, jak N_2 czy CO_2 , pogarsza warunki zapłonu i znacznie obniża górną granicę zapłonu.

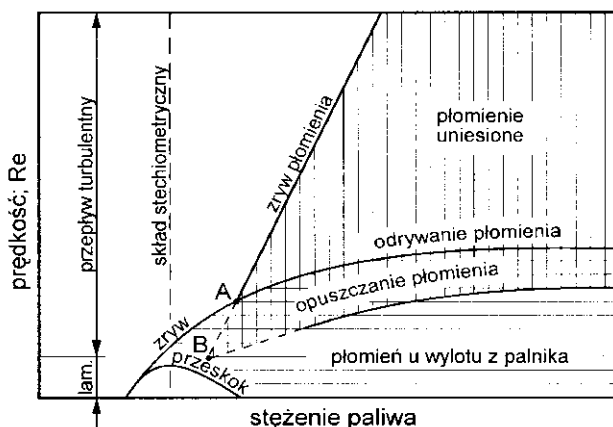
W zależności od sposobu wymieszania paliwa z powietrzem wyróżnia się spalanie kinetyczne i dyfuzyjne. Kinetyczny sposób spalania polega na wstępnym przygotowaniu jednorodnej mieszaniny palnej paliwa i utleniacza, przy czym spalanie zachodzi przy stałym współczynniku nadmiaru utleniacza oraz zadanej temperaturze. W płomieniu kinetycznym przed czołem płomienia występuje wstępna strefa podgrzewania i inicjacji utleniania paliwa, dalej położona jest główna strefa reakcji (czoło płomienia), a za nią – strefa popłomienna. W płomieniu kinetycznym, przy niedomiarze utleniacza, wytwarza się drugi zewnętrzny stożek typu dyfuzyjnego. Dopalają się w nim produkty częściowego utleniania paliwa, jak np. tlenek węgla.

Płomień dyfuzyjny powstaje w warstwie granicznej między strumieniami gazu palnego i gazowego utleniacza lub pomiędzy strumieniem gazu palnego a otaczającym go nieruchomym utleniaczem. W miejscu, w którym stosunek dyfundującego strumienia paliwa do strumienia utleniacza przyjmuje wartość stechiometryczną znajduje się obszar intensywnej reakcji chemicznej, widoczny jako świecąca powierzchnia. W płomieniu dyfuzyjnym chemiczna reakcja spalania jest więc zawsze poprzedzona czysto fizycznym procesem mieszania, który zależy od praw rządzących dyfuzją w strumieniach gazowych. Ze względu na te prawa, płomień dyfuzyjny dzieli się na laminarne i turbulentne.

W płomieniu dyfuzyjnym, podobnie jak w płomieniu kinetycznym, ze względu na dominujące procesy fizyczne i chemiczne, można wyróżnić trzy główne strefy: strefę podgrzewania i inicjacji reakcji chemicznych, główną strefę reakcji oraz strefę popłomienną. W płomieniu dyfuzyjnym różne jest tylko ich usytuowanie. Strefa podgrzewania i inicjacji reakcji chemicznych jest położona po obu stronach czoła płomienia. Główna strefa reakcji ma szerokość od ułamka milimetra do kilku milimetrów. W niej paliwo początkowo podlega procesom pirolizy (kolor żółty). Dalej występuje strefa intensywnej reakcji utleniania (kolor niebieski). Strefa popłomienna w płomieniu dyfuzyjnym jest położona, podobnie jak strefa podgrzewania i inicjacji, z obu stron czoła płomienia, i nie można jej fizycznie wydzielić, dominują w niej procesy równowagowe.

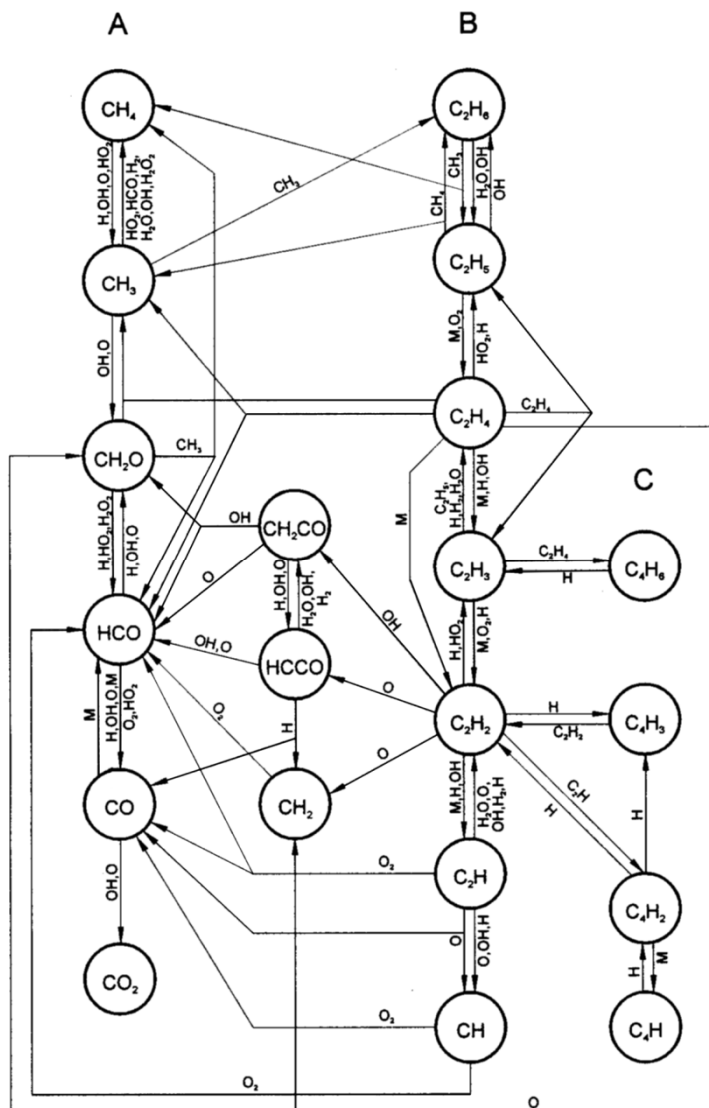
W praktyce stabilność płomienia rozumie się jako zespół warunków, kiedy występowanie płomienia jest możliwe. Przekroczenie tych warunków powoduje przerwanie procesów spalania i zanik płomienia. Warunki stabilności określają nie tylko możliwość istnienia płomienia, ale także jego kształt. Podstawową zasadą, jaką musi spełniać każdy zespół urządzeń do spalania (urządzenia dostarczające paliwo i utleniacz – zasilające, palnik, komora spalania), jest

realizowanie takich warunków, które umożliwiają otrzymywanie, przy danym paliwie, stabilnego płomienia określonego rodzaju. W odniesieniu do urządzeń przemysłowych warunek ten jest zwykle formułowany szerzej. Urządzenie do spalania musi dawać stabilny płomień w pewnych granicach zmian parametrów zasilania. Im szersze są granice parametrów, dzięki którym możliwe jest utrzymanie stabilnego płomienia, tym bardziej elastyczne jest urządzenie [5, 72, 73]. Typowy wykres stabilności płomieni butanu w przestrzeni nieograniczonej przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Wykres stabilności płomieni w przestrzeni otwartej [67]

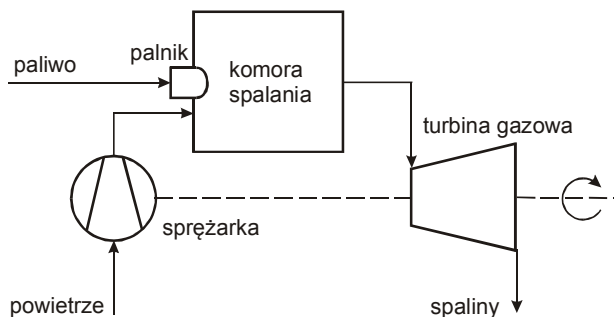
Kinetykę chemiczną utleniania prostego węglowodoru, występującego w fazie gazowej w warunkach naturalnych, najlepiej prześledzić na przykładzie metanu, który jest podstawowym składnikiem gazu ziemnego i jednym ze składników powstających podczas utleniania węglowodorów wyższych, a sam też generuje węglowodory wyższe w procesie utleniania. Mechanizm opisujący utlenianie metanu wydaje się obecnie dobrze poznany, chociaż bierze w nim udział około kilkudziesięciu związków chemicznych. Często stosowany schemat reakcji utleniania metanu [68, 69] obejmuje 123 reakcje. Nie wszystkie są jednakowo ważne. W zależności od tego, w jakich warunkach ciśnienia, temperatury, ilości utleniacza i składu środowiska przebiega proces utleniania metanu, niektóre reakcje są dominujące, a pozostałe można pominąć, gdyż ich wpływ na przebieg procesu jest niewielki. Uproszczony schemat reakcji utleniania metanu przedstawiony na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Schemat mechanizmu utleniania metanu [5]

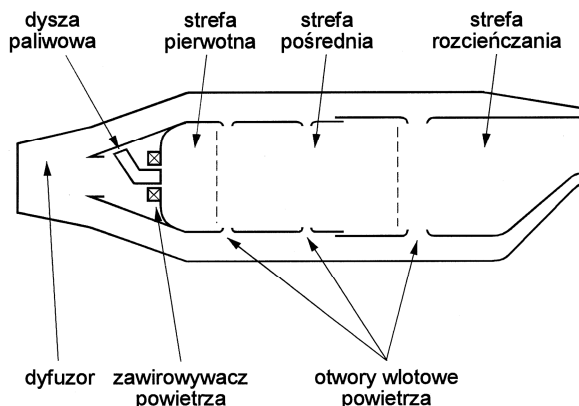
3.2.2. Przemysłowe technologie spalania gazu

W energetyce gaz może być spalany w klasycznych kotłach z palnikami gazowymi, jednakże dużo korzystniejsze wydaje się zastosowanie turbiny gazowej. Turbina gazowa, a właściwie turbinowa siłownia gazowa, w uproszczeniu składa się z turbiny gazowej, sprężarki wirowej i komory spalania (rys. 3.3). Zasada działania turbiny gazowej polega na przekazywaniu energii kinetycznej przepływających spalin wirnikowi turbiny, na którego wale znajduje się także dostarczająca powietrze sprężarka wirowa [70].



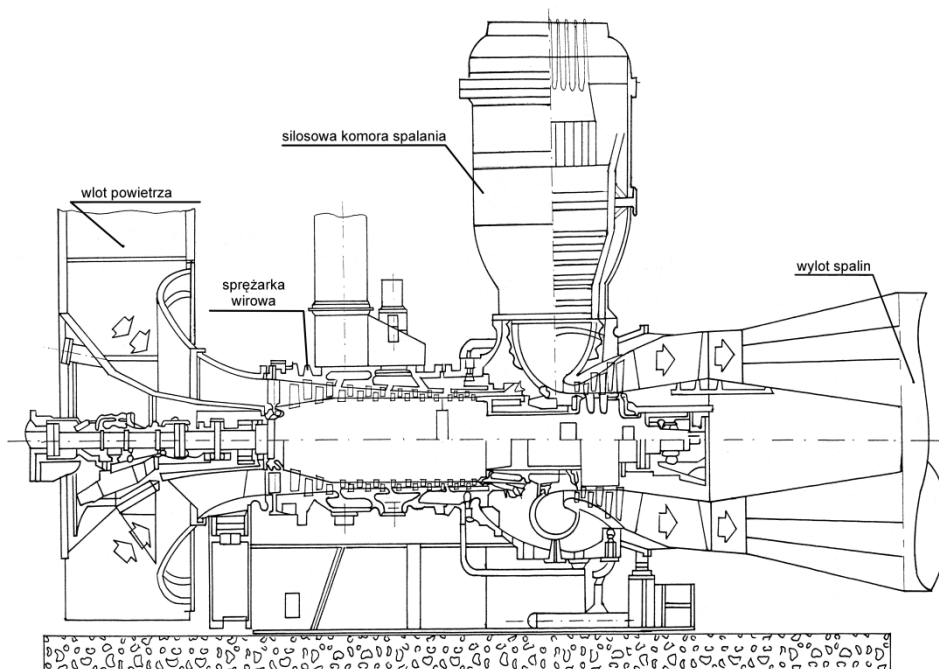
Rys. 3.3. Schemat turbiny gazowej

Organizacja procesu spalania w turbinie gazowej ma elementarne znaczenie dla jej sprawności i trwałości oraz dla emisji zanieczyszczeń. Podstawowy problem polega na zapewnieniu stabilnego spalania w strumieniu powietrza przepływającego z dużą prędkością, przy czym, biorąc pod uwagę całkowitą ilość powietrza podawanego do komory spalania, skład mieszanki palnej jest poniżej dolnej granicy palności. Tak znaczny nadmiar powietrza jest niezbędny do ochrony ścian komory spalania oraz łopatek turbiny przed wysoką temperaturą spalin wynoszącą około 2000°C . Chłodzenie rozwiązuje się poprzez podział całkowitej ilości powietrza podawanego do turbiny gazowej na powietrze pierwotne (około 30%) i rozcieńczające powietrze wtórne (około 70%). Powietrze pierwotne, podawane jest do przedniej części komory i służy do spalania paliwa. Powietrze rozcieńczające służy do schłodzenia spalin podawanych do turbiny gazowej (do $900\div 1400^{\circ}\text{C}$), a ponadto chroni płomienicę [71]. W komorze spalania turbiny gazowej (rys. 3.4) można wyróżnić trzy strefy pierwotną i pośrednią spalania, a za nimi strefę rozrzedzenia [71, 72]. W strefie pierwotnej paliwo spala się w strumieniu silnie zawirowanego powietrza. Temperatura spalania w tej strefie przekracza 2000°C , a obciążenie cieplne komory osiąga $10^7\text{W/m}^3/\text{MPa}$. W strefie pośredniej są dopalane resztki CO i CH ze strefy pierwotnej.



Rys. 3.4. Schemat konwencjonalnej komory spalania turbiny gazowej [5]

Energetyczne turbiny gazowe posiadają zazwyczaj mogą mieć komory spalinyowe w układzie pierścieniowym lub silosowym. W układzie silosowym jest tylko pojedyncza komora spalania (rys. 3.5), co pozwala zredukować koszty turbiny i ułatwia jej eksploatację.



Rys. 3.5. Przekrój turbiny gazowej GT8C [Alstom]

Obecnie dominujące tendencje w rozwoju turbin gazowych mają na celu zwiększenie mocy, poprawę sprawności i zmniejszenie emisji zanieczyszczeń. Realizuje się to przez coraz powszechniejsze stosowanie ubogich płomieni kinetycznych i unikanie płomieni dyfuzyjnych, które charakteryzują się większą emisją tlenków azotu. W przypadku zastosowania do zasilania turbiny paliw płynnych stosuje się wstępne odparowanie paliwa – takie systemy spalania są określane skrótem LPP (ang. *lean, premixed, prevaporized*) [5].

Zasilanie komór spalania ubogimi mieszkankami ($\lambda=2-4$) stwarza zagrożenie zerwania płomienia, zwłaszcza podczas pracy z małym obciążeniem. Stabilność spalania zapewnia się zabiegami konstrukcyjnymi (zmienna geometria komory spalania, sekwencyjne systemy spalania, regulowane zawirowanie powietrza) oraz stosując pomocnicze palniki dyfuzyjne charakteryzujące się szerokim zakresem stabilności spalania. Zastosowanie tych rozwiązań umożliwiło ograniczenie emisji NO_x z turbin gazowych do 25ppm, uzyskanie sprawności 38% i osiągnięcie mocy bloku energetycznego ponad 260MW_e. Nową, obiecującą koncepcją poprawienia parametrów turbin gazowych jest zastosowanie spalania katalitycznego [73, 74, 75].

Rozwój energetycznych turbin gazowych wiąże się z kombinowanymi blokami gazowo-parowymi, w których w przyszłości prawdopodobnie zastosowanie znajdzie węgiel. Najważniejsze technologie wykorzystania węgla w turbinach gazowych to zgazowanie węgla oraz jego spalanie w ciśnieniowych kotłach fluidalnych [76].

3.3. Spalanie węgla

Węgiel kamienny jest podstawowym surowcem energetycznym dla kilkudziesięciu krajów świata, w tym Polski. Istotna pozycja węgla wśród surowców energetyczny wynika z następujących przesłanek [77]:

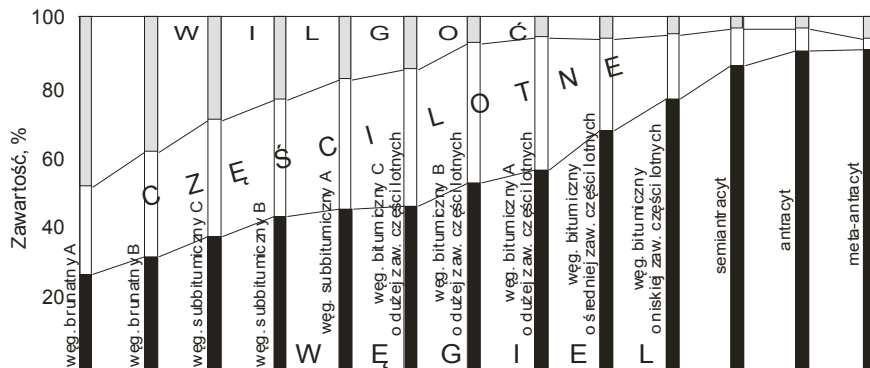
- węgiel wydobywany jest w ponad 50 krajach świata, a jego zasoby oceniane są na kilka stuleci,
- węgiel jest paliwem bezpiecznym, łatwym w przewożeniu i składowaniu,
- znaczne rezerwy węgla i duże ich rozpowszechnienie pozwala zapewnić strategiczne bezpieczeństwo energetyczne wielu krajów,
- współczesne technologie spalania pozwalają użytkować węgiel w sposób niezagrażający środowisku,
- niższa cena jednostki energii w porównaniu z ropą naftową, czy też gazem ziemnym, a przy zastosowaniu współczesnych technologii, pozwala na produkcję energii przy najmniejszych kosztach.

3.3.1. Pochodzenie i charakterystyka węgla

Węgiel jest surowcem energetycznym o szczególnym znaczeniu w Polsce, gdzie około 97% energii elektrycznej uzyskuje się w wyniku spalania węgla [21, 77]. 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 [78, 79]. Większość złóż węgla na świecie powstało w erze paleozoicznej w młodszym okresie karbońskim, około 350-270 mln lat temu [80, 81]. W skład węgla naturalnego wchodzi związki organiczne, zawierające węgiel pierwiastkowy, wodór i tlen przy niewielkiej zawartości azotu, siarki oraz substancje nieorganiczne, inertne w procesie spalania. Zawartość tych ostatnich może wahać się od ułamków ppm do kilku procent [78, 82]. Substancje nieorganiczne, na które składają się przede wszystkim związki glinu (Al_2O_3) i krzemu (SiO_2) nie są związane chemicznie z substancją organiczną [62, 83].

Ocena przydatności węgla jako paliwa odbywa się na podstawie analiz chemicznych: technicznej przybliżonej i elementarnej oraz oznaczania kaloryczności [78]. Analiza techniczna polega na wyznaczaniu względnej zawartości wilgoci, części lotnych, popiołu oraz pośrednio, zawartości węgla (C) związanego. Wyniki takiej analizy dla różnego rodzaju węgla przedstawiono na rys. 3.6. 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.



Rys. 3.6. Wyniki analiza technicznej przeprowadzonej dla najważniejszych gatunków węgla [78]

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:

- 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 decyduje jego skład chemiczny. Jest on określany za pomocą analizy technicznej oraz analizy elementarnej, która polega na określeniu zawartości pierwiastków oraz ich masowych udziałów 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 z zawartością azotu w paliwie wpływa ponadto na emisję tlenków azotu.

3.3.2. Spalanie pojedynczego ziarna węgla

W kotłach energetycznych spalany jest pył węglowy powstały ze zmielenia węgla na drobne cząstki. Około 80% masy węgla stanowią ziarna o średnicach mniejszych od $75\mu\text{m}$ [62, 5]. Tak powstały pył, w palnikach przemysłowych spala się w odpowiednio ukształtowanym strumieniu (żagwi).

Przed przystąpieniem do analizy spalania pyłu węglowego w żagwi przedstawiony zostanie mechanizm spalania pojedynczego ziarna. Istnieje szereg opracowań, jak np. [62, 61, 60, 84, 5, 85, 86, 87] 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. Prędkość nagrzewania jest zależna od rozmiarów cząstki, temperatury oraz jej prędkości i zazwyczaj wynosi około $10^4 \div 10^6 \text{ K/s}$ [5, 62, 88]. Cząstka o średnicy $60 \mu\text{m}$ nagrzewa się do temperatury panującej w komorze spalania w czasie $50 \div 100 \text{ ms}$ [87], głównie na skutek konwekcji. Przy uwzględnieniu przemieszczania się cząstki współczynnik przejmowania ciepła może wzrosnąć nawet kilkadziesiąt razy [60, 5]. W czasie nagrzewania, zawarta w cząstkach węgla woda ulega odparowaniu.

Przy wzroście temperatury do około $300 \div 400^\circ\text{C}$, następuje rozkład termiczny (piroliza) węgla. Początkowo uwalniane są produkty gazowe, a w dalszej kolejności następuje mięknięcie i wydzielanie ciężkich węglowodorów. Przy temperaturze powyżej 800°C następuje wydzielanie CO i H_2 . Ilość i skład części lotnych zależy m.in. od rodzaju węgla oraz warunków (temperatura, ciśnienie), w jakich ten proces następuje. W skład części lotnych wchodzi: para wodna, CO_2 , H_2 , węglowodory (głównie CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_3H_8 , C_3H_6), H_2S oraz N_2 [60, 5, 62].

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 [5, 89, 90, 91, 92, 93].

Stwierdzono, że spalanie części lotnych może przebiegać na dwa różne sposoby, w zależności od tego jak się wydzielają. 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 [5].

Kolejnym istotnym etapem jest spalanie pozostałości koksowej. Oprócz reakcji chemicznych, istotną rolę odgrywają w nim procesy fizyczne, a w szczególności [5]:

- 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 $\text{kg/m}^2/\text{s}$). Parametr ten zależy od gatunku węgla, przy czym jego wartość maleje wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia [91]. Jako przykład może posłużyć szybkość spalania antracytu, która jest trzy razy mniejsza niż w przypadku węgla brunatnego [5].

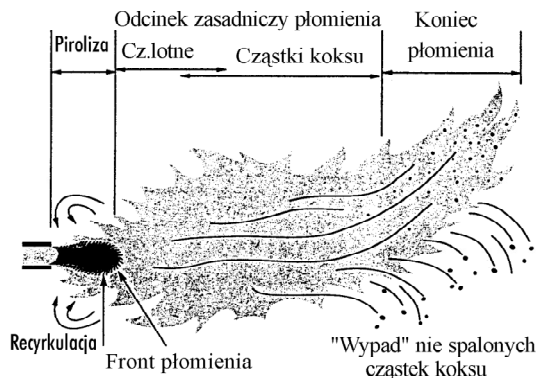
Zawarta w węglu substancja mineralna podczas spalania podlega przemianom fizykochemicznym [84, 92]. Produktami spalania są: popiół lotny, żużel oraz substancje gazowe. Skład popiołu zależy przede wszystkim od substancji mineralnej, którą tworzą najczęściej: kwarc, mulit, magnetyt, hematyt, anhydryt i portlandyt [5].

3.3.3. Przemysłowe technologie spalania węgla

Przemysłowe technologie stosowane przy wykorzystaniu węgla jako paliwa obejmują spalanie w warstwie na ruszcie, spalanie w żagwi (pył węglowy o średnicy ziaren $<100\mu\text{m}$) oraz spalanie w palenisku fluidalnym (warstwa ziaren o rozmiarach $1\div10\text{mm}$). Spalanie węgla w kotłach rusztowych, które należy do najstarszych sposobów spalania paliw stałych, odbywa się zazwyczaj w przypadku jednostek o najmniejszych mocach, nie przekraczających zwykle 50MWt [5].

Ponieważ opisywane w dalszej części niniejszego opracowania metody monitorowania i diagnostyki mają zastosowanie do procesu spalania węgla w kotłach energetycznych z palnikami pyłowymi opis będzie ograniczony tylko do tej technologii.

Płomień pyłowy jest utworzony przez turbulentną strugę mieszanki pyłowo-gazowej wypływającą z dyszy palnika pyłowego [96]. W palenisku gorące spaliny wstępujące do warstwy granicznej mieszają się ze świeżą mieszanką przyczyniając się do zapłonu cząstek węglowych [97, 98]. Płomień jest unoszony ku górze na skutek jego wyższej temperatury od temperatury otaczających spalin. Pierwsza strefa płomienia (rys. 3.7) to rdzeń gęstej strugi mieszanki pyłowej, w której następuje wydzielanie części lotnych. Na jej brzegu formuje się front płomienia a dalej zasadnicza część płomienia składająca się ze strefy spalania części lotnych i mikronowych cząstek węgla, przechodzącej w strefę spalania części lotnych. Strefa ta charakteryzuje się silnym promieniowaniem o cechach analogicznych jak dla sadzy. Koniec płomienia tworzy strefa dopalania większych cząstek węgla. Frakcja największych cząstek „wypada” z płomienia i niespalona opada do leja żużlowego, stanowiąc części palne żużla.



Rys. 3.7. Struktura płomienia pyłowego [5].

Stabilność płomienia zależy od konstrukcji palnika oraz od prędkości propagacji płomienia w mieszance palnej. W przypadku płomienia pyłowego prędkość propagacji jest funkcją właściwości pyłu węglowego (rodzaj węgla i jego rozdrobnienie) oraz składu mieszanki pyłowo-powietrznej [93]. Stabilność poprawia się wraz z rozdrobnieniem węgla i ze zwiększeniem udziału części lotnych w węglu [94].

W palniku pyłowym całkowite powietrze do spalania dzieli się na dwa strumienie: pierwotny i wtórny. Strumieniem powietrza pierwotnego transportowany jest pył węglowy do palnika i jest on tak dobrany, żeby zapewnić maksymalną prędkość propagacji płomienia, czyli najlepszą stabilność płomienia pyłowego. Pozostała część powietrza wprowadzana jest do płomienia pyłowego w jego dalszej części. Z taką konstrukcją palników pyłowych wiąże się również kwestia bezpieczeństwa. Jeżeli prędkość mieszanki pyłowo-powietrznej w przewodzie do palnika będzie zbyt mała, może nastąpić „cofnięcie płomienia”, czyli propagacja płomienia w przewodzie pyłowym prowadząca nawet do detonacji. Zapobiec temu może dobranie prędkości przepływu mieszanki do palnika ponad prędkość propagacji płomienia, która w warunkach kotłowych sięga 20m/s [5].

Spalanie cząstek pozostałości koksowej odbywa się na całej długości płomienia pyłowego z udziałem powietrza wtórnego. Z powodów nie do końca poznanych, wypalenie węgla w kotle pyłowym nie jest całkowite, co objawia się udziałem części palnych w popiele lotnym i w żużlu. Bezpośrednią przyczyną niedopału jest prawdopodobnie zbyt wczesne zgaśnięcie cząstek pozostałości koksowej, może to wynikać ze zbyt krótkiego czasu przebywania w palenisku (za duże cząstki węgla) lub pogorszenia warunków spalania. Niecałkowite spalanie pogarsza sprawność kotła – ocenia się, że 1% niedopału powoduje stratę około 1mln USD/rok w przypadku bloku energetycznego o mocy 1000MWe [5]. Ponadto przekroczenie 5% udziału substancji organicznych w lotnym popiele bardzo ogranicza jego zastosowania technologiczne, co oznacza konieczność składowania. Badania laboratoryjne i praktyka kotłowa

wskazują, że o zawartości części palnych w popiele i zużłtu decydują następujące czynniki [95, 5]:

- jakość przemiału węgla,
- chemiczna reaktywność pozostałości koksowej,
- warunki spalania.

Wypalenie ulega pogorszeniu, jeżeli zastosuje się niskoemisyjne techniki spalania w celu zmniejszenia emisji NOx. W takim przypadku należy polepszyć przemiał węgla.

3.4. Spalanie biomasy

Najważniejszą zaletą stosowania biopaliwa jest zerowy bilans emisji głównego gazu cieplarnianego jakim jest ditlenek 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 potencjalnie 2 do 3 razy mniejsza emisja tlenków azotu. Obniżenie zawartości SO₂ w spalinach pozwala na rezygnację z kosztownej instalacji odsiarczania spalin.

Zobowiązania przyjęte przez Polskę w negocjacjach z Unią Europejską przewidują wyprodukowanie w 2020 roku 19% krajowego zużycia energii elektrycznej z wykorzystaniem źródeł odnawialnych, zakładając, że 4% będzie pochodziło z biomasy (np. drewno odpadowe, uprawy energetyczne, osady ściekowe, itp.). Istnieje duża różnorodność gatunków biomasy nadających się do energetycznego wykorzystania. Przewagę ma biomasa o strukturze lignino-celulozy [5, 96], dlatego w dalszej części opisane będzie przede wszystkim spalanie drewna oraz niektórych pozostałości z produkcji roślinnej.

3.4.1. Spalanie drewna i słomy

Z powodu dużej zawartości wilgoci oraz części lotnych w drewnie, podczas jego spalania można wyróżnić cztery fazy [5, 96]. Drewno najpierw nagrzewa się i suszy, praktycznie bez chemicznego reagowania, następnie następuje rozkład termiczny, po czym lotne produkty rozkładu spalają się w fazie gazowej, a w końcu spala się karbonizat. Usuwanie wilgoci z drewna wymaga dostarczenia około 1,6 kJ energii na kilogram wody. Rozkład termiczny drewna zaczyna się od rozkładu hemicelulozy już w temperaturze około 220°C, następnie rozkładają się celuloza i lignina. Najwięcej części lotnych wydzielą się z drewna w temperaturze 250÷450°C [97], a do ich najważniejszych składników gazowych należą CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ i H₂. Ważniejsze ciekłe składniki termicznego rozkładu drewna to woda, metanol, kwas octowy, aldehyd octowy i smoła. Pozostałość koksowa po odgazowaniu drewna (karbonizat) potocznie zwana jest węglem drzewnym.

Proces spalania drewna jest podobny do spalania młodych węgli, a zwłaszcza węgli brunatnych. Duża zawartość tlenu w drewnie oraz pary wodnej w lotnych

produktach jego rozkładu termicznego powodują, że strefa spalania części lotnych jest bardziej rozciągnięta, a temperatura w niej niższa niż w przypadku spalania węgla. Teoretycznie temperatura spalania części lotnych z rozkładu termicznego drewna może sięgać 1750°C, ale zawartość wody w drewnie znacznie ją obniża. Ilość sadzy powstająca podczas spalania części lotnych z drewna jest znacznie mniejsza niż podczas spalania węgla. Temperatura spalania małych cząstek pozostałości koksowej (<100µm) w płomieniu wynosi aż 1200÷1700°C [5, 96].

Wilgotność i skład chemiczny słomy są zbliżone do drewna, chociaż w słomie jest więcej celulozy [5]. Mechanizm spalania obu tych paliw jest podobny, ale w porównaniu z drewnem słoma spala się wolniej. Po spaleniu słomy powstaje około dziesięć razy więcej popiołu niż po spaleniu drewna. Cechą charakterystyczną słomy jest znaczny udział potasu i wynikająca stąd niska temperatura mięknięcia popiołu (około 800°C) [98].

3.4.2. Współspalanie biomasy z węglem

Współczesne kotły energetyczne z paleniskami pyłowymi lub fluidalnymi zużywają od 200 do 600Mg węgla na godzinę. Zastąpienie węgla biomasą w paleniskach tych kotłów jest więc niemożliwe z powodu trudności z dostawą i magazynowaniem wymaganej ilości biomasy. Stąd powstała koncepcja współspalania (ang. *cofiring* lub *co-combustion*) biomasy z węglem, ponieważ nawet niewielki udział biomasy w wytwarzaniu energii elektrycznej oznacza znaczne wykorzystanie jej potencjału energetycznego.

W istniejących kotłach energetycznych opalanych węglem istnieją dwie możliwości energetycznego wykorzystania biomasy – współspalanie bezpośrednie i pośrednie [99]. Współspalanie bezpośrednie może się odbywać poprzez:

- mieszanie biomasy z węglem przed układem dozowania węgla do kotła (młynami) i podawanie tej mieszaniny do komory paleniskowej kotła przez istniejący układ nawęglania i palniki pyłowe,
- niezależne przygotowanie biomasy – rozdrobnienie i spalanie na ruszcie pod kotłem lub dozowanie do palników ewentualnie nad palnikami węglowymi niezależnym strumieniem.

W tym ostatnim przypadku możliwe jest użycie biomasy jako paliwa reburningowego. Druga możliwość to współspalanie pośrednie, w którym:

- istnieje przedpalenisko – do komory paleniskowej kotła wnoszone jest ciepło spalin ze spalania biomasy,
- następuje wstępne zgazowanie biomasy – do komory paleniskowej wprowadzany jest wilgotny gaz palny.

Wykonano wiele badań współspalania biomasy z węglem w kotłach energetycznych [100, 99], które pokazały zalety i wady tego sposobu jej wykorzystania. Stwierdzono, że najlepiej do współspalania biomasy z węglem

nadają się kotły fluidalne, które mogą być nawet całkowicie opalane biomasą. Typowe kotły rusztowe pozwalają współspalać kilkanaście procent drewna z węglem bez znacznego pogorszenia parametrów pracy kotła. Najtrudniej zorganizować współspalanie biomasy (drewna lub słomy) w kotłach pyłowych, przede wszystkim z powodu problemów z jej rozdrobnieniem w młynach węglowych w stopniu zbliżonym do rozdrobnienia węgla. Podatną formą do spalania drewna w kotłach pyłowych są trociny, natomiast spalanie zrębków z węglem stanowi duży problem z powodu trudności z odpowiednim rozdrobnieniem w młynach węglowych [5, 99].

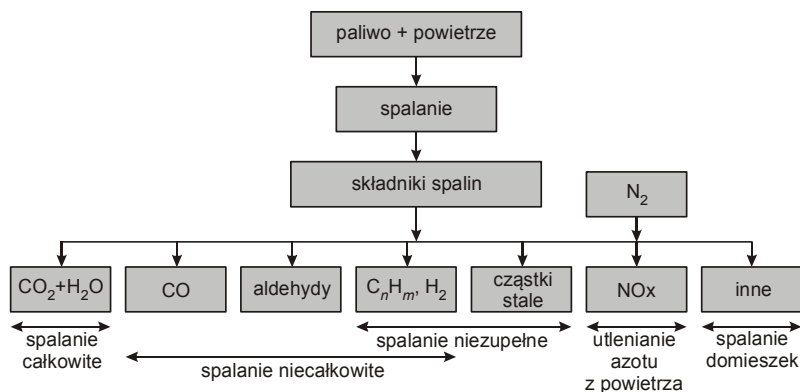
Uważa się [5], że obiecującym sposobem współspalania biomasy z węglem w kotłach pyłowych jest zgazowanie biomasy w gazogeneratorze z cyrkulującym złożem fluidalnym, a następnie spalanie gazu w palenisku pyłowym. Zaletą tego systemu spalania jest możliwość wykorzystania różnego typu biomasy, nawet bardzo zawilgoconej, bez konieczności jej rozdrabniania w stopniu niezbędnym dla paleniska pyłowego. Gaz można również spalać w turbinach. Wadą systemu jest znaczny koszt inwestycyjny gazyfikatora fluidalnego.

3.5. Środowiskowe aspekty spalania

Ocenia się, że spalanie paliw kopalnych, jest najpoważniejszym źródłem zanieczyszczeń atmosfery [21, 127]. Emisja zanieczyszczeń bardzo zależy od rodzaju spalanego paliwa. Do podstawowych zanieczyszczeń powstających w procesie spalania zalicza się:

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

Znaczenie tych zanieczyszczeń dla środowiska naturalnego podkreśla fakt prawnego ograniczenia ich emisji [128].



Rys. 3.8. Ważniejsze składniki spalin ze spalania paliw kopalnych [5]

Ditlenek węgla nie jest gazem trującym, jednak dla środowiska naturalnego nie jest obojętny. Ocenia się, że antropogenna emisja CO₂, szacowana na 10 do 30% emisji całkowitej, jest na tyle znacząca, żeby wywołać zauważalne zmiany klimatu, określane mianem efektu cieplarnianego. Oprócz CO₂ do efektu cieplarnianego przyczyniają się: metan, freony, halony, ozon, tlenek diazotu a także, choć w niewielkim stopniu woda. Ograniczenie emisji ditlenku 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 [21]. Innym sposobem jest wykorzystanie biomasy jako pierwotnego nośnika energii. Zasadniczą zaletą biomasy jako paliwa jest zerowy bilans CO₂ w cyklu wytwarzania biomasy (wiązanie CO₂) – spalanie biomasy (uwalnianie CO₂).

Azot tworzy tlenki azotu od NO do N₂O₅, ale tylko trzy z nich mogą powstać w wyniku spalania: N₂O, NO i NO₂. W procesie spalania powstaje najwięcej tlenków azotu NO oraz niewielka ilość dwutlenku NO₂. W technice spalania stosuje się pojęcie NO_x, jako mieszaniny tlenków NO i NO₂ (jako suma NO+NO₂ w przeliczeniu na NO₂) [60]. Tlenki azotu NO_x odgrywają najważniejszą rolę w procesie zanieczyszczania powietrza w skali lokalnej, prowadząc do kwaśnych deszczy, smogu fotochemicznego i dziury ozonowej. Ograniczyć emisję NO_x można jeszcze w kotle – tzw. pierwotnymi metodami ograniczania emisji NO_x [129] lub poprzez redukcję już powstałych tlenków za kotłem z użyciem tzw. metod wtórnych.

Tlenki siarki (przede wszystkim SO₂, także SO₃) powstają na skutek utleniania siarki zawartej w paliwie. Wnoszą one znaczny udział do zanieczyszczania powietrza atmosferycznego powodując kwaśne deszcze, zakwaszające glebę i zbiorniki wodne, co prowadzi, np. do obniżenia żyzności gleb, czy do zubażania lub nawet eliminacji życia roślinnego i zwierzęcego. Ich korozyjne właściwości powodują powstawanie poważnych trudności eksploatacyjnych urządzeń kotłowych i turbin. Ze względu na czas przebywania w atmosferze, który waha się od 24 godzin do 4 dni [21, 62], mogą się one przemieszczać na znaczne odległości. Dlatego w bilansie zanieczyszczeń dla danego kraju istotne jest uwzględnienie eksportu i importu dwutlenku siarki. Obniżenie emisji tlenków siarki realizowane jest w specjalnych instalacjach odsiarczających.

Występująca w paliwach stałych substancja mineralna ulega podczas spalania przemianom, tworząc w rezultacie odpad paleniskowy. W kotłach pyłowych i rusztowych odpad paleniskowy ma postać lotnego popiołu i żużlu. W kotłach pyłowych na lotny popiół przypada 85–90%, a na żużel 10–15% [130]. Właściwości i granulacja lotnego popiołu zależą przede wszystkim od: substancji mineralnej węgla, typu węgla i temperatury spalania. Popioły zawierają szkliwa i substancję krystaliczną w postaci pospolitych minerałów,

np. kwarc, mulit, magnezyt, hematyt, ferryty, gips, entryngit, anhydryt, anataz i korund [131] a także pierwiastki, głównie Ca, Mg, Ti, Na, K, P, S i Li oraz pierwiastki śladowe, np. As, B, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn, Y i inne [132]. W Polsce popioły lotne dzieli się ze względu na udział głównych składników chemicznych na: krzemianowe, glinowe i wapniowe. Roczna produkcja popiołów lotnych tylko z energetycznego spalania węgla sięga w Polsce około 13mln Mg. Składowanie lotnych popiołów ma negatywne skutki dla środowiska naturalnego głównie poprzez wtórne pylenie, zanieczyszczenie gleby dioksynami i furanami oraz związkami siarki, a ponadto wymywanie metali ciężkich do wód gruntowych [132]. W energetyce dąży się do zagospodarowania popiołów lotnych przez ich wykorzystanie na podsadzki do kopalń, do rekultywacji terenów oraz w budownictwie. Lotne popioły są składnikiem niektórych betonów, pod warunkiem ograniczenia udziału części palnych do 5%.

Jak już wspomniano, Polsce około 97% energii elektrycznej pochodzi z elektrowni węglowych, w których rocznie spala się ponad 40mln Mg węgla kamiennego i ponad 60mln Mg węgla brunatnego. Podejmowane są międzynarodowe wysiłki zmierzające do zahamowania wzrostu emisji CO₂, który jest głównym gazem cieplarnianym. W większości krajów uprzemysłowionych emisja SO₂, NO_x, CO i pyłów jest ograniczana odpowiednimi aktami prawnymi, a ponadto istnieje system opłat i kar za wprowadzanie tych zanieczyszczeń do atmosfery [128]. Oprócz zanieczyszczeń, których emisja do powietrza jest prawnie ograniczona, energetyka węglowa emituje inne zanieczyszczenia np. metale ciężkie, WWA, LZO (lotne zanieczyszczenia organiczne) oraz dioksyne i furany.

Turbiny gazowe wytwarzają zanieczyszczenia typowe dla spalania węglowodorów: NO_x, CO, CH₄, a kiedy są zasilane olejem, wówczas także cząstki węgla i SO₂. Emisja tych zanieczyszczeń zależy od rodzaju paliwa i obciążenia turbiny. Podczas spalania gazu ziemnego z zastosowaniem konwencjonalnych palników gazowych, o mocy kilkudziesięciu megawatów, w kotłach energetycznych udział NO, w spalinach sięga 300mg/m³ [5].

3.6. Niskoemisyjne techniki spalania

Ograniczenie emisji NO_x w procesie spalania można podzielić na przedsięwzięcia realizowane w kotle i za kotłem. W grupie pierwszej wyróżnia się:

- niskoemisyjne techniki spalania, tzw. metody pierwotne [133],
- 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:

- selektywną redukcję katalityczną (SCR),
- nieselektywną redukcję katalityczną (NSCR),
- metody absorpcyjne [21].

Metody drugiej grupy przyjęło się nazywać metodami wtórnymi.

Efektywność redukcji emisji NO, definiuje się następująco:

$$\eta_{red} = \frac{1 - [\text{NO}]_{red}}{[\text{NO}]} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

gdzie $[\text{NO}]$, $[\text{NO}]_{red}$ oznaczają udziały NO w spalinach odpowiednio przed i po redukcji. Efektywność redukcji NO_x przy stosowaniu metod pierwotnych generalnie nie przekracza 50%, wtórnych dochodzi do 95%. Metody pierwotne są jednak powszechniej stosowane, głównie ze względów ekonomicznych – koszty inwestycyjne i eksploatacyjne są przynajmniej rząd wielkości mniejsze [5]. 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:

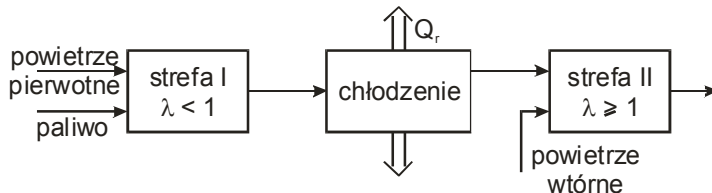
- obniżanie temperatury spalania,
- zmiana rozdziału powietrza,
- zmiana rozdziału paliwa,
- zmiana aerodynamiki spalania,
- wykorzystanie redukujących właściwości płomienia bogatego.

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. Mimo pewnego zagrożenia utratą stabilności procesu przy spalaniu węgla, obniżanie temperatury spalania jest również wykorzystywane dla zmniejszenia emisji NO_x . Jest ono bardziej widoczne przy spalaniu węgla kamiennego, niż brunatnego [134].

Zależność wielkości emisji NO_x od nadmiaru powietrza w procesie spalania jest dosyć złożona i zależy od kilku czynników, a przede wszystkim od rodzaju płomienia oraz od zawartości w paliwie azotu paliwowego N_F . W płomieniach ubogich, azot paliwowy szybko utlenia się do NO_x , zaś w płomieniu bogatym 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 [135]. Redukcja emisji NO_x tą metodą ograniczona jest do około 15% ze względu na zwiększenie niedopału, szlakowania i korozji [21].

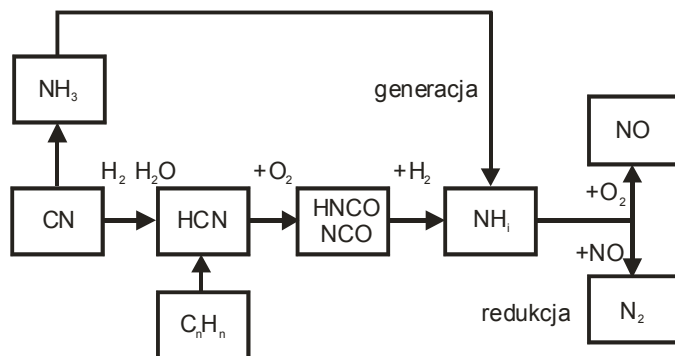
Niskoemisyjne spalanie ze stopniowaniem powietrza polega na podziale obszaru spalania na dwie strefy – bogatą i ubogą. Metoda ta ma największy wpływ na wielkość redukcji emisji NO_x w przypadku spalania paliw zawierających azot związany i dlatego stała się podstawową techniką niskoemisyjnego spalania w kotłach pyłowych [21]. W pierwszej strefie odbywa się spalanie z niedoborem tlenu, czyli tworzy się strefa redukująca, dodatkowo z obniżoną 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. 3.9.



Rys. 3.9. Zasada niskoemisyjnego spalania ze stopniowaniem powietrza [21]

Uproszczony mechanizm tworzenia się i redukcji paliwowych NO_x w bogatej strefie spalania [135] przedstawiony został na rys. 3.10. W trakcie termicznego rozkładu paliwa, paliwowy azot w postaci rodnika CN, ulega przekształceniu w lotne produkty jego rozkładu, tj. prostsze związki azotowe. Wśród nich dominują cyjanowodór (HCN) i amoniak (NH_3). Są one 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 azotu cząsteczkowego N_2 oraz do rodników azotowych i aminowych (N, NH, NH_2), które mają zdolność 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 NH_3 pochodzące z pierwszej strefy utleniają się do NO_x .



Rys. 3.10. Dominujący mechanizm powstawania i redukcji paliwowych NO_x w bogatym płomieniu pyłowym [21, 135].

Na efektywność ograniczenia emisji realizowanej metodą stopniowania powietrza wpływają warunki panujące w pierwszej bogatej strefie. Są to przede wszystkim [21]:

- czas przebywania, który nie powinien być krótszy niż 1s – znacznie zależy od mocy (rozmiarów) kotła,

- współczynnik nadmiaru powietrza λ_1 , który powinien być w zakresie $0,7 \div 0,8$ – większy nadmiar powietrza powoduje wzrost syntezy NOx 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.

W przypadku turbin gazowych początkowo stosowano wtrysk wody w celu obniżenia temperatury w głównej strefie spalania płomienia dyfuzyjnego. Obecnie stosuje się stopniowanie powietrza i ubogi płomień kinetyczny (odwrotnie niż w przypadku spalania pyłu węglowego). Obniżenie emisji NOx otrzymuje się głównie na skutek obniżenia temperatury spalania. Technologia znana jest pod nazwą LPP (ang. *Lean Premixed Prevaporized*).

3.7. Współczesne problemy technologii spalania

Stosowanie niskoemisyjnych technik spalania powoduje również pojawienie się efektów ubocznych, które powodują problemy w eksploatacji kotłów pyłowych. Najważniejsze z nich to [21, 136, 62]:

- korozja niskotlenowa,
- zwiększenie udziału części palnych w popiele i żużlu,
- zwiększenie udziału CO w spalinach,
- niedogrzanie pary wtórnej,
- zwiększenie szlakowania,
- szybsze zużywanie się elementów palników (dysze, łopatki),
- 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 wysokich obciążeń [5]. 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. 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.

Również w przypadku turbin gazowych niska emisja okupiona jest trudnościami technologicznymi. Ponieważ obniżenie emisji NOx otrzymuje się poprzez spalanie bardzo ubogiej mieszanki, płomień znajduje się bardzo blisko granicy palności, dlatego konieczna jest bardzo dokładna regulacja i stosowanie płomienia pilotującego. Czynniki destabilizujące to: fluktuacje przepływu powietrza ze sprężarki, fluktuacje składu i przepływu paliwa i fluktuacje obciążenia.

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

Właściwa diagnostyka i sterowanie procesem spalania stają się zagadnieniami jeszcze ważniejszymi, gdy uwzględni się współspalanie węgla i biomasy. W warunkach polskich, jest to jedna z częściej stosowanych metod wykorzystania paliw odnawialnych. Wykorzystanie biomasy w kotłach energetycznych, oprócz niewątpliwych korzyści, ma także negatywne skutki [99, 137, 138]. Współspalanie biomasy z węglem wymaga najmniejszych nakładów inwestycyjnych, ale jest to okupione stosunkowo niską efektywnością spalania [139]. Wymaga ono dostarczenia do kotła energetycznego odpowiednio rozdrobnionej mieszaniny paliwa i powietrza. Potrzebne są więc dodatkowe urządzenia do składowania, transportu i wstępnego rozdrobnienia biomasy, która podawana jest razem z pyłem węglowym do zespołów młynowych, gdzie oprócz dodatkowego rozdrobnienia, następuje również mieszanie paliwa. Często biomasa nie jest kruszona i gromadzi się w młynie, blokując przepływ rozdrobnionego paliwa. Powoduje to nadmierne nagrzewanie się elementów młyna, a stosunkowo niska temperatura zapłonu wraz z dużą zawartością części lotnych sprzyja samozapłonowi. Wprowadzanie strumienia rozdrobnionej biomasy za pomocą palnika do paleniska pyłowego zagraża cofnięciem płomienia do przewodu transportującego i wywołaniem pożaru.

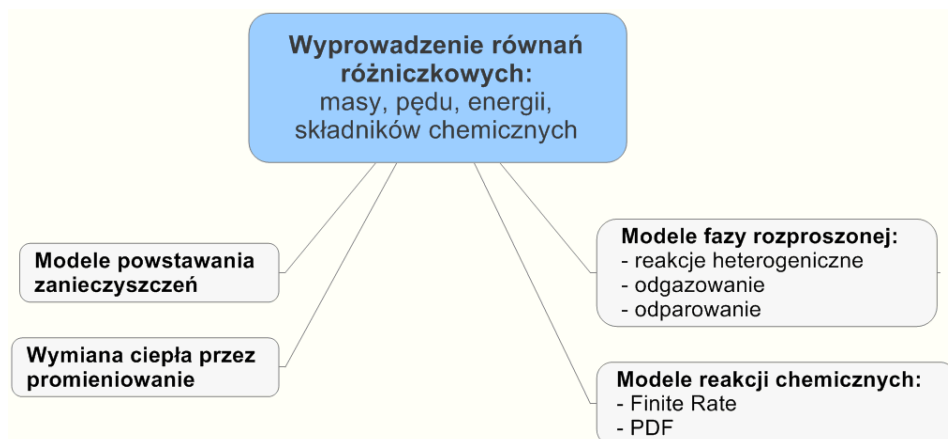
Wprowadzanie biomasy czyni proces spalania trudniejszym w prowadzeniu, gdyż często posiada ona strukturę włóknistą, jak np. zrębki drzewne. Prowadzi to do sytuacji, w której biomasa jest w młynie miażdżona a nie kruszona, jak ma to miejsce w przypadku węgla. Posiada ona niższą gęstość niż węgiel i zdecydowanie większą wilgotność, co powoduje, że podczas transportu paliwa te mają tendencję do rozwarstwiania się. Problem ten uwidacznia się już w ciągu nawęglania. Mieszanina 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 [140, 141].

Z innych problemów współspalania biomasy z pyłem węglowym należy jeszcze wymienić zagrożenie wybuchowe spowodowane podawaniem rozdrobnionej biomasy do paleniska i zagrożenia pożarowe związane ze składowaniem biomasy.

Jak wspomniano, gaz uzyskany ze zgazowania biomasy może być użyty jako paliwo alternatywne lub współspalany w turbinach gazowych. Głównym problemem jest zmienność jego składu wynikająca ze zmienności składu biomasy. Tu znów niezbędne staje się opracowanie i wdrożenie odpowiednio szybkich metod kontrolno-pomiarowych i diagnostycznych [142, 143].

3.8. Numeryczne modelowanie spalania

Na podstawie nawet tak skróconego opisu można stwierdzić, że spalanie zarówno paliw gazowych, jak i pyłu węglowego jest procesem bardzo złożonym. Osiągnięcia współczesnej technologii obliczeniowej pozwalają na dosyć wierne modelowanie zjawisk zachodzących podczas spalania. Jest ono przedmiotem badań w zakresie numerycznej mechaniki płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics – CFD*) – działu mechaniki zajmującego się modelowaniem ruchu płynów za pomocą metod numerycznych. Na rys. 3.11 przedstawiono schematycznie sposób modelowania procesu spalania [101].



Rys. 3.11. Schemat matematycznego modelowania procesu spalania

Stałemu udoskonalaniu podlegają modele składowe: wymiany ciepła [109, 110, 111, 112, 113, 114, 115], turbulencji [107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115], fazy rozproszonej [124, 125, 126, 127], czy reakcji chemicznych [119, 120, 121, 122]. Do modelowania zachowań anormalnej dyfuzji wielu autorów proponuje modele oparte na liniowych lub nieliniowych równaniach różniczkowych, coraz częściej wykorzystuje się równania różniczkowe niecałkowitego rzędu [123, 124, 125, 126].

Komputerowe modelowanie spalania nie może jeszcze znaleźć zastosowania w diagnostyce w czasie rzeczywistym, ponieważ wymaga bardzo dużych mocy obliczeniowych niedostępnych systemom przemysłowym.

4. Optyczne metody pomiarowe procesu spalania

Nadzór procesu spalania, szczególnie w warunkach przemysłowych, jest konieczny zarówno z uwagi na bezpieczeństwo, jak i ze względów ekonomicznych.

Tabela 4.1. Metody pomiaru istotnych parametrów procesu spalania [144]

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
	zmiana właściwości ciała stałego	płomień, spaliny
Zawartość CO	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
	zmiana właściwości ciała stałego	spaliny
Zawartość CO ₂	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
	emisja w zakresie IR	płomień, spaliny
	zmiana właściwości ciała stałego	spaliny
Zawartość H ₂ O	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
Zawartość HC	zmiana właściwości ciała stałego	mieszanka paliwowa, spaliny
Zawartość NO _x	absorpcja w zakresie IR	spaliny
	zmiana właściwości ciała stałego	spaliny
Zawartość O ₂	absorpcja w zakresie bliskiej IR	mieszanka paliwowa, płomień
	zmiana właściwości ciała stałego	spaliny

Monitoring, nie wspominając o sterowaniu, wymaga informacji o przebiegu procesu spalania, uzyskanej na podstawie analizy w czasie rzeczywistym sygnałów z szeregu czujników wykorzystujących różne zasady działania i umieszczonych w różnych miejscach obiektu (instalacji), w którym proces spalania jest realizowany. Tabela 4.1 zawiera przegląd metod stosowanych do pomiaru najważniejszych parametrów procesu spalania [144].

Ocena przebiegu procesu spalania z wykorzystaniem płomienia, od dawna dokonywana była przez człowieka na podstawie informacji dostarczanych przez zmysł wzroku, tj. wizualnej oceny płomienia. W tym celu w kotle energetycznym istnieje szereg otworów inspekcyjnych. Dostęp optyczny może być również realizowany poprzez instalacje czujników wewnątrz palnika. Niektóre kotły energetyczne są wyposażone w specjalnie przystosowane kamery, pozwalające na przeniesienie obrazu wnętrza komory spalania do pomieszczenia operatorskiego. Chłodzenie i czyszczenie optyki najczęściej dokonywane jest za pomocą sprężonego powietrza.

Potencjalnie większe możliwości, pod względem ilości parametrów dają metody aktywne (absorpcyjne, PIV, LDV, LIF), np. [160, 161, 162]. Jednak stosowanie ich w warunkach przemysłowych jest bardzo utrudnione, o ile w ogóle możliwe. Poza tym zastosowanie do płomieni pyłowych jest problematyczne.

W dalszej części zostaną opisane czujniki pasywne, które wykorzystują promieniowanie emitowane przez płomień od rozgrzanych cząstek stałych, chemiluminescencji i termicznego wzbudzenia gorących gazów.

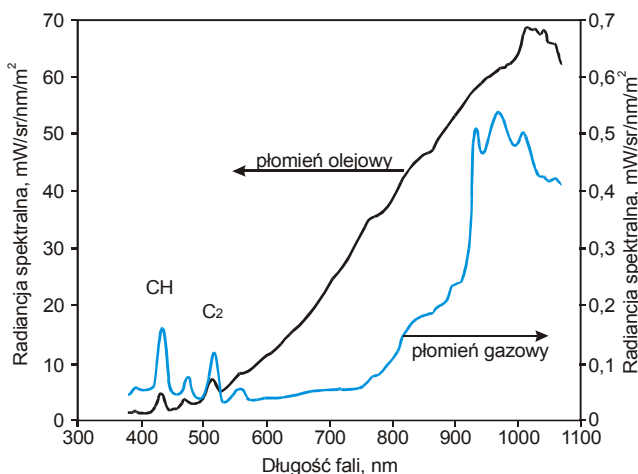
4.1. Płomień jako źródło promieniowania

Na całkowite promieniowanie wytwarzane w płomieniu składają się [145]:

- promieniowanie, którego źródłem są rozgrzane cząstki stałe: węgiel, koks, popiół i sadza, przy czym ich koncentracja w przestrzeni płomienia nie jest jednakowa,
- promieniowanie emitowane na skutek chemiluminescencji, związane z występowaniem wolnych rodników (m.in. OH^* , CH^* , C_2^* , HCN^* , NH^* , NH_2^*), których nie można traktować tak samo jak gazów gorących o podobnej zawartości składników głównych,
- promieniowanie emitowane przez gorące gazy znajdujące się w płomieniu na skutek wzbudzenia termicznego, które tworzą przede wszystkim widma emisyjne rotacyjne głównych gazów występujących w płomieniu – H_2O , CO_2 , CO .

Z tych trzech składników promieniowanie rozgrzanych cząstek jest najsilniejsze a chemiluminescencja – najsłabsza. Z tego względu płomień pyłowy będzie zdominowany przez promieniowanie cząstek, a chemiluminescencja będzie widoczna tylko w normalnym i ubogim kinetycznym płomieniu gazowym. W płomieniu dyfuzyjnym zawsze pojawiały się będą

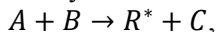
cząstki sadzy i jego promieniowanie będzie miało charakter promieniowania cząstek stałych. Na rys. 4.1. pokazano widma stechiometrycznego płomienia gazowego i olejowego. Widoczne jest, że w widmie emisyjnym płomienia gazowego piki wywołane chemiluminescencją są porównywalne z promieniowaniem gorących gazów, natomiast promieniowanie płomienia olejowego jest zdominowane przez promieniowanie cząstek stałych, które w zakresie 900nm do 1100nm jest ponad sto razy większe.



Rys. 4.1. Widma emisyjne płomienia gazowego i olejowego (różne skale) [146]

4.2. Chemiluminescencja

W płomieniu wzbudzone rodniki powstawać mogą nie tylko na skutek wzbudzenia termicznego, lecz także w wyniku reakcji chemicznych, w których zachodzi brak równowagi energetycznej – zjawisko to jest zwane chemiluminescencją. Jej mechanizm został dokładnie opisany, np. w [145, 147, 148]. Opisywana reakcja przebiega w dwóch etapach. W pierwszym, w reakcji dwóch substratów powstaje wzbudzony rodnik R^* :



w drugim etapie następuje spontaniczna emisja energii w postaci fotonu:

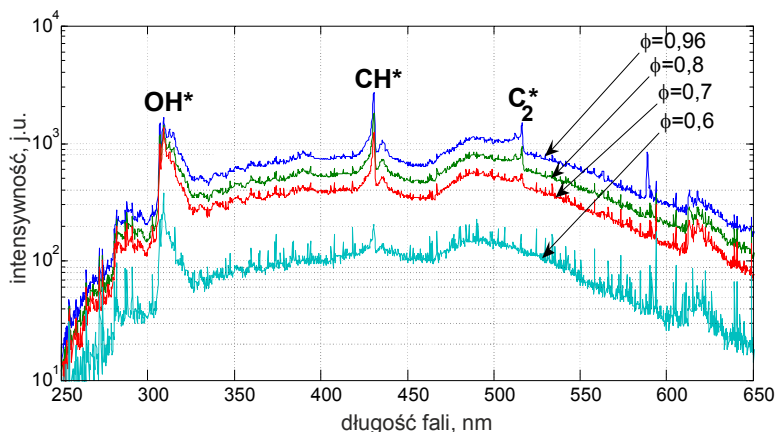


Widmo promieniowania emitowanego na skutek chemiluminescencji składa się z kilku linii emisyjnych, grupujących się w charakterystyczne pasma, właściwe dla występujących rodników. W przypadku płomieni gazowych są to głównie rodniki OH^* , CH^* , C_2^* i CO_2^* [145, 144, 149, 150, 151]. Dla wymienionych rodników, widma chemoluminescencji przypadają głównie na zakres UV i światła widzialnego. Tabela 4.2 zawiera zestawienie najbardziej widocznych rodników dla typowego płomienia przemysłowego oraz przejścia generujące widoczne długości fali, a na rys. 4.2 pokazano spektrogram typowego płomienia metanowego z zaznaczeniem emisji najważniejszych

rodników (pomiaru wykonano w trakcie badań opisanych w rozdziale 6.1.3). Inne rodniki, np. NO^* , HNO^* i CN^* również emitują w tym zakresie długości fali, zwłaszcza w płomieniach bogatych w azot [152, 153, 154], lecz ich intensywność jest niższa o około trzy rzędy wielkości [155, 144].

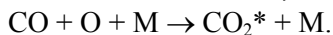
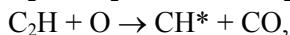
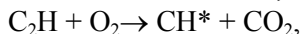
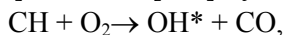
Tabela 4.2. Wzbudzone rodniki obserwowane w płomieniach [145, 156]

Rodnik	Przejście	$\lambda(\text{nm})$
OH^*	$\text{A}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Pi (\Delta v = 1)$	282,9 (Q2)
	$\text{A}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Pi (\Delta v = 1)$	308,9 (Q2)
CH^*	$\text{B}^2\Sigma^- \rightarrow \text{X}^2\Pi$	387,1
	$\text{A}^2\Delta \rightarrow \text{X}^2\Pi$	431,4
C_2^*	$\text{A}^3\Pi_g \rightarrow \text{X}^3\Pi_u$ (Swan)	516,5
CO_2^*	kontinuum	350 — 500 (widmo ciągłe)
HNO^*	kontinuum	660 — 770 (widmo ciągłe)

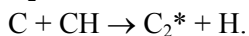
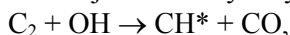


Rys. 4.2. Widmo emisyjne płomienia mieszanki gazu naturalnego z powietrzem dla różnych proporcji mieszanki z zaznaczeniem pików emisji głównych rodników na skutek chemiluminescencji

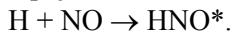
Mechanizm powstawania wzbudzonych rodników nie jest jeszcze do końca poznany, zwłaszcza dla C_2^* . Podstawowe reakcje formowania OH^* , CO_2^* [157, 158] oraz CH^* [159] są następujące:



Dodatkowe reakcje powstawania CH^* i C_2^* zostały zidentyfikowane, ale nie określono jeszcze stałych tych reakcji [144]:



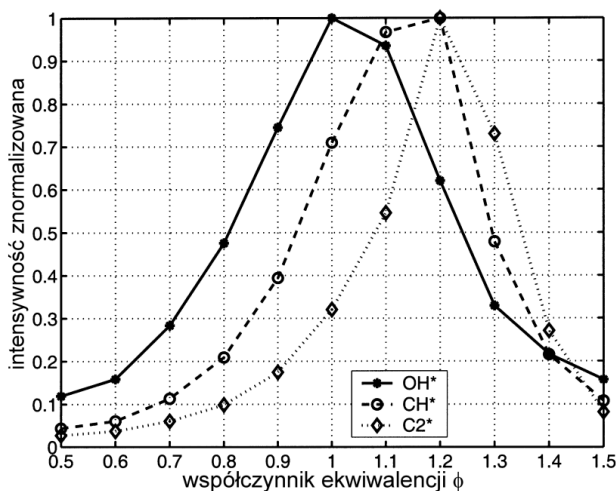
Reakcje powstawania wzbudzonych rodników zawierających azot są następujące [160]:



Symulacje chemiluminescencji OH^* i CH^* z użyciem wyznaczonej kinetyki reakcji mają dosyć dobrą zgodność doświadczalną dla płomieni metan/powietrze zarówno pod ciśnieniem atmosferycznym [157, 159], jak i podwyższonym [161].

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 [162].

Dla diagnostyki spalania najbardziej interesującą właściwością chemiluminescencji jest jej związek z ważnymi parametrami płomienia. Korelacja pomiędzy stosunkiem paliwo/powietrze została opisana w wielu pracach [163, 164, 165, 161, 166, 167, 168, 169, 170]. Na rys. 4.3. pokazano zależność emisji znormalizowanych OH^* , CH^* i C_2^* od współczynnika ekwiwalencji ϕ dla płomienia kinetycznego metan/powietrze przy ciśnieniu atmosferycznym. Pomiany wykonano za pomocą spektrometru s siatką 600 linii/mm, z użyciem filtrów o szerokości połówkowej 10nm i centrów przy 310nm – OH^* , 431nm – CH^* i 516nm – C_2^* [161].



Rys. 4.3. Zależność emisji znormalizowanych OH^* , CH^* i C_2^* od współczynnika ekwiwalencji ϕ dla płomienia kinetycznego metan/powietrze przy ciśnieniu atmosferycznym [161]

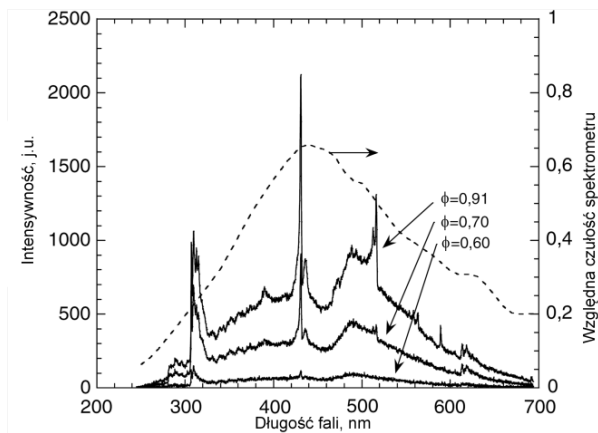
Sygnały chemiluminescencji zostały użyte do opisu fluktuacji emisji ciepła [171, 172, 173, 174, 175, 176] oraz opisu ruchu frontu płomienia [177, 178, 179, 180, 181, 182, 183].

Badany był również przestrzenny rozkład chemiluminescencji w płomieniu. Ponieważ obszary emisji chemiluminescencji są wielkości rzędu dziesiątych

części milimetra, do dokładnych pomiarów laboratoryjnych, na przykład do sprawdzenia modeli kinetycznych, aparatura powinna mieć bardzo dobrą rozdzielczość przestrzenną. Możliwe jest również odtworzenie lokalnego rozkładu promieniowania za pomocą technik tomograficznych [184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192]. Używane były również kamery CCD [193, 161, 194, 195]. Niektóre rozwiązania optyczne umożliwiają pomiary do pewnej głębokości z użyciem pojedynczego czujnika, np. użyciem optyki Cassegraina [184, 167, 196, 197]. W [198] wykazano przewagę tej konfiguracji nad układem ze szczeliną i pojedynczą soczewką. Układ Cassegraina został wykorzystany do pomiaru lokalnej chemiluminescencji w wielu dalszych badaniach [148, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 198, 205, 206].

Czujniki oparte na chemiluminescencji zostały zastosowane praktycznie do śledzenia fluktuacji emisji ciepła [207, 208, 209, 173, 176, 174, 179], współczynnika ekwiwalencji [165] a także w układach regulacji punktu pracy kotła [163, 193], czy optymalizacji jego pracy [210, 181]. Skonstruowane zostały również czujniki do pomiaru mieszania w cylindrze silnika tłokowego [169, 211]. Chemiluminescencja została również wykorzystana do regulacji punktu pracy turbiny gazowej [212, 161, 166].

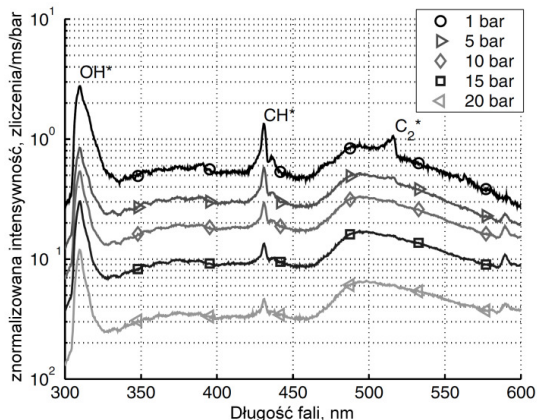
Intensywność chemiluminescencji dla płomieni ubogich rośnie wraz ze spadkiem nadmiaru powietrza [161, 202, 213, 214] (rys. 4.4). Dla płomieni bogatych emisja OH^* wykazuje maksimum przy $\phi \sim 1,0$, a CH^* przy $\phi \sim 1,1$. Emisja C_2^* wykazuje maksimum przy $\phi \sim 1,1-1,2$ i przesuwa się ono w kierunku wyższych wartości ϕ przy niższych ciśnieniach i mniejszych gradientach prędkości [161, 202].



Rys. 4.4. Widmo emisyjne płomienia mieszanki gazu naturalnego z powietrzem dla różnych proporcji mieszanki. Linia przerywaną zaznaczono krzywą czułości spektrometru [215]

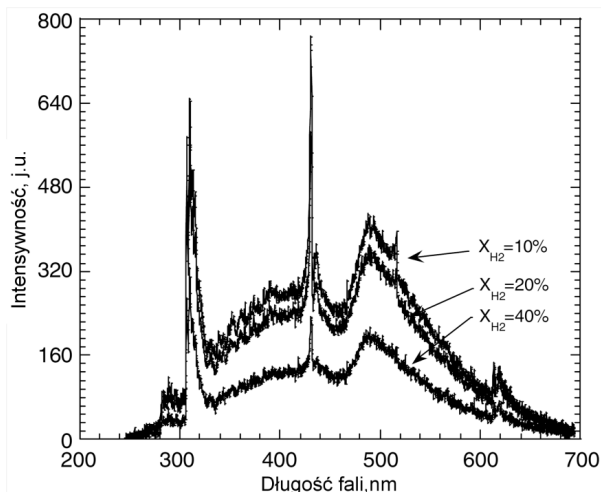
Ciśnienie ma duży wpływ na kształt widma emisyjnego (rys. 4.5), a najbardziej zauważalny jest spadek udziału pików CH^* i C_2^* . Efekt ten może uniemożliwić użycie tych pików do diagnostyki spalania w wysokociśnienio-

wych komorach spalania. Wpływ ciśnienia na intensywności pików OH* i CH* znormalizowanych względem przepływu masy paliwa zostały określone odpowiednio na $p^{-0.86}$ [213] oraz $p^{-0.22}$ [214].

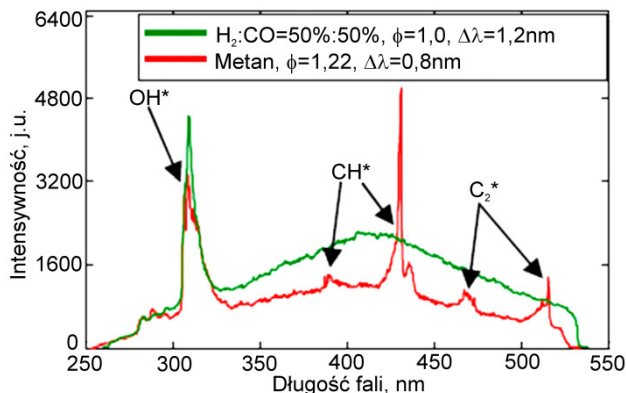


Rys. 4.5. Widma emisyjne płomieni metan-powietrze dla mieszanki stechiometrycznej przy różnych ciśnieniach (przepływ masy był korygowany tak, aby utrzymać stałą prędkość gazów wylotowych) [216]

Jak można było przewidywać na podstawie danych, które zawiera tabela 4.2, zmiany składu paliwa będą znacząco wpływały na zmianę składu spektralnego promieniowania płomienia gazowego. Na rys. 4.6 pokazano widma emisyjne płomienia przy różnych proporcjach mieszanki wodoru i metanu. Widoczne jest zmniejszenie udziału pików CH* i C2* wraz ze zwiększeniem udziału wodoru w mieszaninie. Piki te całkowicie zanikają w płomieniach bez węglowodorów np. przy spalaniu czystego wodoru [217], czy gazu syntezowego (rys. 4.7) [218].



Rys. 4.6. Widmo emisyjne płomienia różnych mieszanin metanu z wodorem przy $\phi=0,7$ [215]



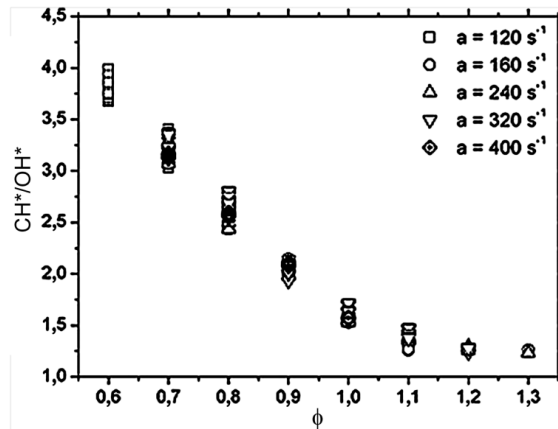
Rys. 4.7. Typowe widma emisyjne płomieni gazu syntezowego i metanu [218]

Większość badań chemiluminescencji płomienia wykonano dla płomienia laminarnego, płomień turbulentny wciąż stanowi ważny temat badań nad metodami jego diagnostyki. Najważniejszą różnicą pomiędzy tymi dwoma płomieniami jest prędkość odkształcenia (ang. *strain rate*) prowadząca do ważnych zmian w strukturze stref reakcji. W wyniku badań kontrolowanego wpływu prędkości odkształcenia na widmo płomienia [147, 191, 219, 213] stwierdzono, że taki wpływ istnieje, chociaż jest dużo mniejszy niż wpływ stechiometrii i ciśnienia [219]. Autorzy tej ostatniej pracy wskazują również, że efekt turbulencji zmniejsza się jeżeli sygnał chemiluminescencji płomienia jest uśredniony przestrzennie i czasowo dla całego płomienia. W ich badaniach uśredniony sygnał CH* znormalizowany względem przepływu paliwa był praktycznie taki sam dla płomienia laminarnego i turbulentnego ($Ka \sim 1$) (Karlovitz number) w zakresie $\phi = 0,6 - 1,0$.

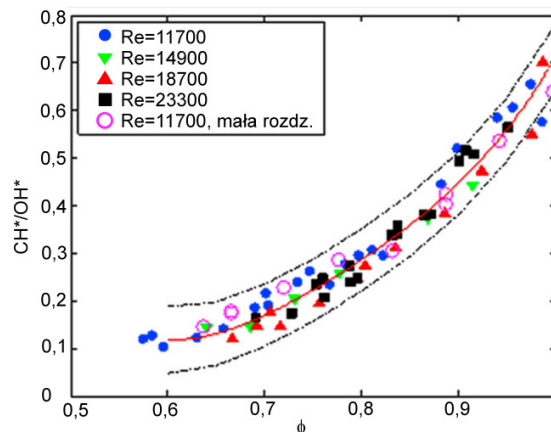
Systemy diagnostyczne oparte na chemiluminescencji wymagają detekcji promieniowania w określonych pasmach. Najczęściej używane są układy pojedynczych detektorów (fotopowielaczy, rzadziej fotodiod) wyposażonych w filtry interferencyjne o szerokości pasma rzędu kilku nanometrów i centralnej długości fali odpowiadającej pikowi promieniowania danego rodnika. Aby uzyskać obraz z tego samego obszaru płomienia stosuje się podział wiązki optycznej za pomocą elementów optyki klasycznej lub światłowodów. W praktyce laboratoryjnej możliwe jest również użycie monochromatorów lub spektrometrów [220, 218, 221, 219, 202, 216, 222, 223].

Obecnie typowym podejściem do budowy czujników opartych na chemiluminescencji jest wykorzystanie relacji między sygnałami chemiluminescencji pochodzących od dwóch rodników OH*/CH*, CH*/C₂*, itd. Sposób ten, zaproponowany w 2002 roku [216] w dużym stopniu zmniejsza wpływ parametrów geometrycznych i optycznych czujnika. Na przykład, zwiększone tłumienie na skutek zabrudzenia okien bardzo obniża energię sygnału docierającego do detektorów [224], jednakże niemalże nie ma wpływu

na wielkości stosunków sygnałów [216]. Taka normalizacja powoduje również mniejszą wrażliwość na zmiany obciążenia termicznego, zmiany wielkości uwalnianego ciepła, czy też obecność turbulencji. W kilku pracach wykazuje się również, że OH^*/CH^* jest stosunkowo niewrażliwy na zmiany prędkości odkształcenia (rys. 4.8) [147, 202, 203, 204] (przy niewielkiej wrażliwości C_2^*/CH^* dla $\phi < 1,3$), aerodynamikę płomienia oraz intensywność turbulencji [222, 223] (rys. 4.9). Zależność OH^*/CH^* od ϕ może być użyta do diagnostyki palników o różnej konstrukcji, w szerokim zakresie przepływów i wielkości turbulencji.



Rys. 4.8. Stosunek bezwzględnych mierzonych intensywności chemiluminescencji OH^*/CH^* w funkcji współczynnika ekwiwalencji, z prędkością odkształcenia a jako parametrem dla płomienia kinetycznego mieszanki powietrza i gazu ziemnego [147]



Rys. 4.9. Zależność CH^*/OH^* od współczynnika ekwiwalencji płomienia kinetycznego metan-powietrze dla różnych osiowych liczb Reynoldsa w palniku wirowym (linia ciągła przybliżenie 4 rzędu metodą najmniejszych kwadratów, linia przerywana: 95% ufności) [223]

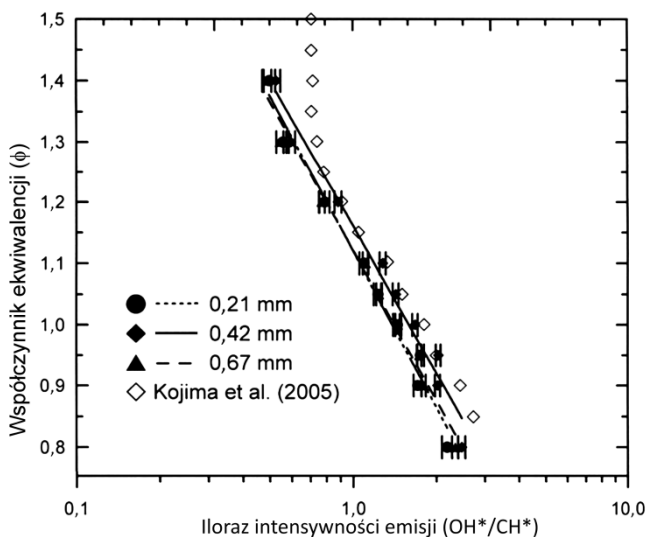
W przypadku diagnostyki przemysłowej, wysoka rozdzielczość przestrzenna nie jest potrzebna, a nawet może przynosić efekty odwrotne do zamierzonych. Wystarcza wtedy bardzo prosty układ optyczny obejmujący dużą część lub całość płomienia. Nie jest jednak pewne czy dane otrzymane z badań rozkładu przestrzennego mogą być stosowane do sygnałów otrzymanych w wyniku uśredniania wysoce niejednorodnych przestrzennie emisji rodników [54]. Wartości OH^*/CH^* zmierzone lokalnie oraz metodami uśredniającymi były podobne dla płomieni kinetycznych [202] i kinetyczno-dyfuzyjnych [192], co mogłoby sugerować, że wyniki otrzymane ze szczegółowego modelowania lub pomiarów mogą być również słuszne dla danych uśrednionych przestrzennie. Należy jednak zauważyć, że z powodu uśrednienia nieskorelowanego promieniowania z różnych obszarów płomienia sygnał taki nie odzwierciedla rzeczywistych fluktuacji związanych z turbulencją [201].

Wykorzystanie zależności pomiędzy współczynnikiem ekwiwalencji ϕ i ilorazem natężeń promieniowania chemiluminescencji w dwóch pasmach (różne pary spośród OH^* , CH^* , C_2^* i CO_2^*) opisywane jest w wielu pracach. Do poprawnej pracy układu diagnostycznego najbardziej korzystne byłoby, aby taki iloraz był silną i monotoniczną funkcją ϕ niezależną od innych parametrów płomienia. Wydaje się, że OH^*/CH^* spełnia te warunki. Jak pokazano na rys. 4.8 i rys. 4.9 dla różnych warunków spalania (liczb Reynoldsa i prędkości odkształcenia) zachowanie tego ilorazu jest podobne. Wartość OH^*/CH^* jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika ekwiwalencji dla płomieni ubogich i lekko bogatych ($\phi < 1,3$) [148, 220, 218, 219, 222, 192, 225]. W opracowaniach obejmujących szerszy zakres stechiometrii spalania stwierdza się, że CH^*/OH^* posiada maksimum w okolicach $\phi = 0,6-0,7$ [213, 216, 224, 225]. Iloraz C_2^*/CH^* jest wprost proporcjonalny do ϕ ale generalnie bardziej zależny od prędkości odkształcenia [202], bardziej nieliniowy [148, 192, 226] i w niektórych przypadkach może stać się niemonotoniczny [202, 146]. Promieniowanie tła z powodu szerokopasmowej chemiluminescencji CO_2^* było rejestrowane w zakresach wolnych od wpływu chemiluminescencji OH^* , CH^* i C_2^* . Opisywane były różne zależności $\text{CH}^*/\text{CO}_2^*$ od ϕ – wprost proporcjonalna [202, 216, 225] i odwrotnie proporcjonalna [224]. W przypadku spalania paliw nie zawierających węglowodorów (np. gaz syntezowy), pod uwagę można brać jedynie stosunek $\text{CO}_2^*/\text{OH}^*$ jednakże jego czułość na zmiany ϕ jest niewielka [202, 219].

Pomimo identyfikacji pewnych wspólnych zależności we wszystkich cytowanych publikacjach nie są one jakościowo identyczne i istnieją między nimi duże ilościowe różnice [54, 215]. Może to być spowodowane różnym podejściem do pasmowej emisji CO_2^* [223]. Należy zauważyć, że pomiar mocy optycznej w pewnym paśmie charakterystycznym dla danego rodnika (np. $\sim 431\text{nm}$ dla CH^*) zawiera również część pochodzącą od ciągłego „tła” CO_2^* . Sprawia to, że krzywa zależności ilorazu intensywności chemiluminescencji od ϕ zależy również od rozdzielczości widmowej czujników oraz od tego czy odjęte zostało tło [227]. Istotna jest również odpowiednia kalibracja toru

optoelektronicznego uwzględniająca charakterystyki widmowe elementów optyki i detektorów promieniowania. Różnice w podejściu do obliczeń mogą do pewnego stopnia wyjaśniać całkowicie odwrotne zależności opisywane np. przez [223] i [213] dotyczące wpływu ciśnienia na krzywą zależności OH^*/CH^* od ϕ .

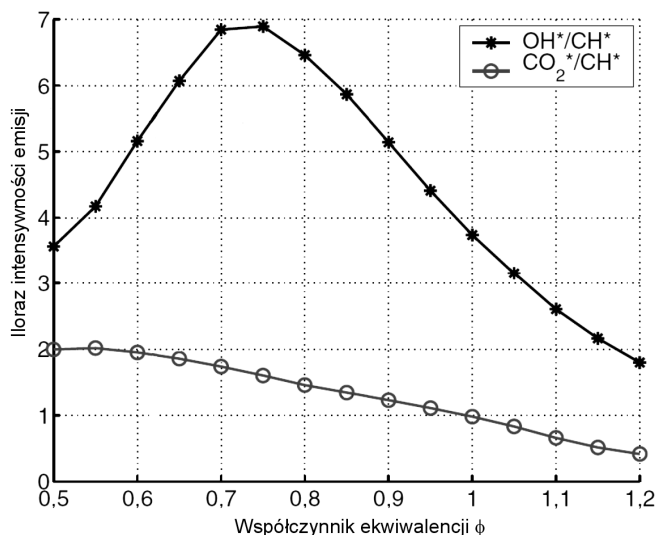
Najczęściej badanym przypadkiem jest płomień kinetyczny metan-powietrze. Krzywa zależności chemiluminescencji od ϕ zmienia się w zależności od rodzaju paliwa, jak pokazano w [222], [200] i [226], w których paliwa gazowe i ciekłe były spalane w tym samym stanowisku (odpowiednio palnik wirowy, palnik przeciwpądowy i silnik spalania wewnętrznego). Krzywe OH^*/CH^* i $\text{CO}_2^*/\text{CH}^*$ wykazały pewien wpływ ilości CO_2 dodanego do gazu ziemnego w płomieniu kinetycznym [225]. Porównanie krzywych dla płomieni kinetycznych i dyfuzyjnych wykazuje ich bardzo duże podobieństwo dla płomieni ubogich, ale krzywe stają się nagle rozbieżne, gdy zostaną osiągnięte warunki stechiometryczne [220], jak pokazano na rys. 4.10 (zgodnie również pojedynczym punktem przy $\phi=1$ [147]). Tendencje obserwowane w płomieniach kinetyczno-dyfuzyjnych dla bogatych warunków aż do $\phi=10$ są całkowicie odmienne od tych, które zazwyczaj uzyskane dla $\phi < 1,5$ [192].



Rys. 4.10. Porównanie zależności współczynnika ekwiwalencji od lokalnego ilorazu OH^*/CH^* dla różnych rozdzielczości przestrzennych oraz wynikami opisanymi w pracy [148]

Niektórzy autorzy (np. [219]) sugerują, że może istnieć „uniwersalna” zależność pomiędzy ilorazami chemiluminescencji i współczynnikiem ekwiwalencji ϕ . Jednakże powyżej przedstawiona analiza wskazuje, że istnieją różne ilościowe i jakościowe zależności przy różnych warunkach i potrzebne są dalsze badania w celu znalezienia opisu dostatecznie uniwersalnego. Część różnic da się wytłumaczyć różną metodyką badań [219]. Przy obecnym stanie

wiedzy wydaje się konieczna kalibracja ad-hoc dla danego zastosowania (urządzenia, warunków pracy), aby powiązać ilorazy chemiluminescencji z ϕ . Zaobserwowane relacje zostały wyliczone w postaci empirycznych korelacji chemiluminescencji ze współczynnikiem ekwiwalencji ϕ i innych parametrów, takich jak np. ciśnienie [20,41,42,61,68,72,78]. W przypadku zależności niemonotonicznych, do uzyskania jednoznacznych estymacji ϕ niezbędny jest więcej niż jeden stosunek intensywności chemiluminescencji [216].



Rys. 4.11. Ilorazy OH*/CH* oraz CO₂*/OH* w funkcji współczynnika ϕ dla laminarnego płomienia kinetycznego [216]

Szybka optyczna diagnostyka współczynnika ekwiwalencji ϕ pozwala na skonstruowanie regulatora stabilizującego stechiometrię spalania na żądanej wartości zadanej, niezależnie od zakłóceń, np. w postaci zmiennego przepływu powietrza lub zmiennego składu paliwa. Jednym z pierwszych tego typu rozwiązań był układ wykorzystujący krzywe kalibracyjne [216] pokazane na rys. 4.11. W dalszej części opisana zostanie modyfikacja tej metody zaproponowana przez autora.

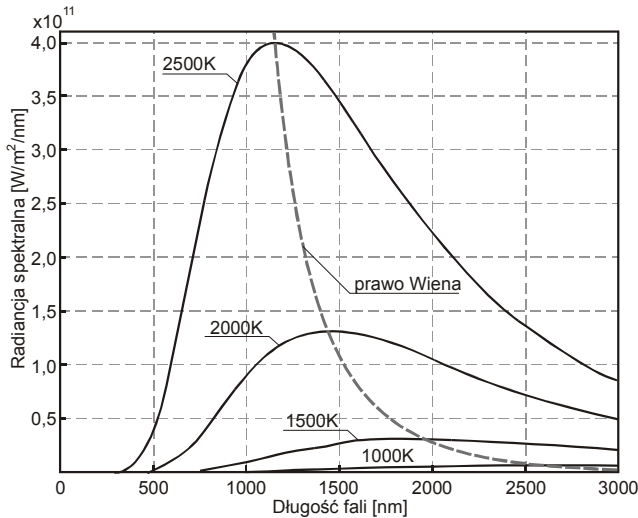
4.3. Promieniowanie cząstek stałych

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

$$u(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1}, \quad (4.1)$$

przy czym $u(\lambda, T)$ oznacza strumień promieniowania na jednostkę powierzchni (irradiancję), jednostkę kąta bryłowego ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) dla danej długości fali λ , w temperaturze T , $\epsilon(\lambda)$ to emisyjność ciała szarego dla danej długości fali, h stała Plancka, c oznacza prędkość światła, a k stałą Boltzmanna.

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, a uzyskane widma mają charakter ciągły, przy czym znaczna część energii promieniowania przypada na zakres podczerwieni. W takim przypadku, maksymalna wartość irradiancji obliczona na podstawie rozkładu Plancka, przy założeniu, że $\epsilon(\lambda) = 1$, w zakresie temperatur $T = 1000 \div 2500\text{K}$, wynosi odpowiednio od 2890nm do 1160nm (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Radiancja spektralna ciała doskonale czarnego wg rozkładu Plancka oraz przesunięcie maksimum wg prawa Wien'a

W płomieniach zawierających sadzę możliwe jest wyznaczenie lokalnej temperatury płomienia na podstawie promieniowanie przez nią emitowanego. Powszechnie przyjmuje się, że cząstki sadzy pozostają w równowadze termicznej z najbliższym otoczeniem [144], chociaż w pewnych warunkach cząsteczka sadzy może osiągnąć równowagę promieniowania ze źródłem dominującym w palniku [228]. Zależność emisyjności sadzy od długości fali w zakresie od IR do UV była badana przez różnych autorów [229, 230, 231, 232, 233] i może być zapisana jako [231]:

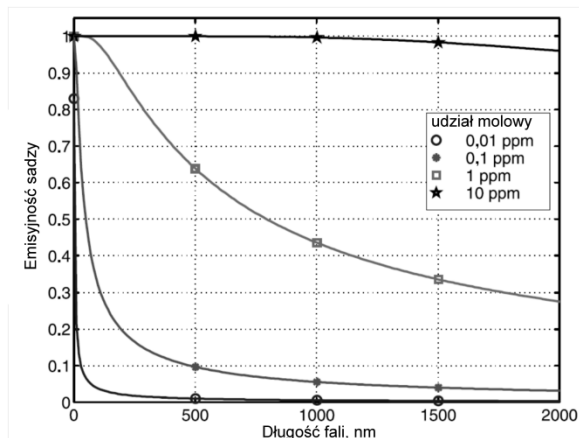
$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \tau_{\lambda} = 1 - \exp(-\kappa_{\lambda} L) = 1 - \exp\left(-\frac{P_1 f_V}{\lambda^{p_2}} L\right), \quad (4.2)$$

gdzie L oznacza długość drogi, f_V oznacza objętościowy udział cząstek sadzy, p_2 pewną stałą niezależną od rodzaju paliwa (z zakresu 0,77 – 1,25 wg [233] lub $0,83 \pm 0,08$ wg [230]), natomiast p_1 – pewien parametr z zakresu od 4,9 [234] do 6,0 [231]. Na rys. 4.13 pokazano emisyjność sadzy dla kilku objętościowych udziałów cząstek. Jest ona bliska jedności przy $\lambda < 2\mu\text{m}$ i $f_V > 1\text{ppm}$, dla małych wartości f_V szybko spada wraz ze wzrostem długości fali.

Do wyznaczenia temperatury można wykorzystać dwie techniki:

- pomiar szerokopasmowy, a następnie dopasowanie modelu parametrycznego do zmierzonej krzywej [185, 187],
- technikę pirometrii dwubarwowej [243, 250, 251, 252].

Błąd pomiaru został oszacowany pomiędzy 20K a 50K [185, 236] w zależności od typu palnika i techniki pomiarowej. Przy użyciu tomografii możliwe jest uzyskanie przestrzennego rozkładu pola temperatur [18, 200, 202, 250, 253]. Rozkład temperatury został również otrzymany dla palnika turbiny gazowej z użyciem pirometru światłowodowego [228].



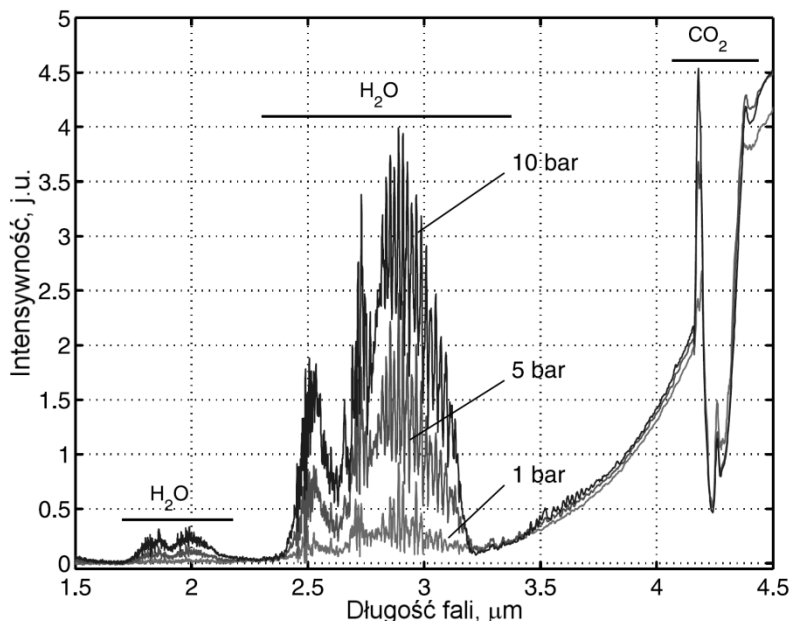
Rys. 4.13. Charakterystyka widmowa emisyjności cząstek sadzy (4.2), dla kilku udziałów molowych. ($L=1\text{m}$, $p_2=0,83$ i $p_1=6,0$) [230]

Promieniowanie cząstek stałych (przede wszystkim sadzy) stanowi dominującą składową emisji płomienia pyłowego. Jest ona przynajmniej dwa rzędy wielkości większa niż chemiluminescencja i promieniowanie gorących gazów [144]. W diagnostyce zazwyczaj wykorzystuje się czasowe i przestrzenne charakterystyki promieniowania cząstek stałych w płomieniu [54].

4.4. Promieniowanie gorących gazów

Emisja gorących produktów spalania, głównie H_2O , CO_2 i CO , widoczna jest w zakresie podczerwieni w postaci pasm rotacyjnych i wibracyjnych. Na rys. 4.14. pokazane są widma emisyjne płomienia stechiometrycznej mieszaniny metanu i powietrza przy ciśnieniu 1, 5 i 10 bar. Zostały zarejestrowane za

pomocą spektrometru FTIR o rozdzielczości $0,125\text{cm}^{-1}$ z użyciem światłowodów. W obszarze powyżej $3,2\mu\text{m}$ widoczna jest absorpcja włókna a w okolicy $4,2\mu\text{m}$ absorpcja przez zimny CO_2 [237].



Rys. 4.14. Widma emisyjne płomienia stechiometrycznej mieszaniny metanu i powietrza [237]

Na podstawie rotacyjnych i wibracyjnych pasm emisji produktów spalania (H_2O , CO_2 lub CO) w zakresie podczerwieni można określić temperaturę. Pomiary mogą zostać wykonane, np. spektrometrem FTIR (ang. *Fourier Transform Infrared*) [238, 239, 240, 241]. Spektrometry Fourierskie nie nadają się jednak do zastosowań przemysłowych ze względu na skomplikowaną i delikatną konstrukcję oraz zbyt długi czas odpowiedzi. Zostały więc opracowane systemy wieloczułnikowe oraz wykorzystujące banki filtrów [242, 243]. Ich zasada działania opiera się na porównywaniu zarejestrowanego promieniowania z modelem lub bazą danych albo na identyfikacji parametrów modelu (w tym temperatury) na podstawie odczytów z czujnika. Wyznaczanie temperatury w ten sposób jest skomplikowane ponieważ parametry linii i pasm, oprócz temperatury, zależą od wielu innych czynników, np. stężenia, ciśnienia itd. [264].

5. Metody analizy danych

Sygnały z czujników optycznych zawierają dużo informacji, która ma bardzo małe opóźnienie względem sygnałów wejściowych, ale ich interpretacja jest bardzo złożona. Najprostsze czujniki do wykrywania obecności płonienia nie wymagają zbyt skomplikowanych metod analizy – wystarcza odpowiednia detekcja progowa. Metody optyczne dostarczają jednak o wiele więcej informacji. Do diagnostyki procesu spalania można stosować wiele cech sygnału optycznego. Wstępna selekcja tych cech pod względem istotności może zostać wykonana metodą analizy składowych głównych. Problem stanowi jednakże dalsza interpretacja cech. Wydaje się, że najlepiej w tym przypadku będą sprawdzały się metody sztucznej inteligencji. W dalszej części zostaną opisane stosowane najczęściej klasyczne i rozmyte sieci neuronowe oraz, stosunkowo niedawno opracowane, metody wzorowane na systemie immunologicznym.

5.1. 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 [244, 245, 246]. Celem analizy składowych głównych jest zmniejszenie liczby wymiarów badanego zbioru danych przy zachowaniu maksymalnej zmienności w sensie wariancji/kowariancji [245, 246]. PCA pozwala również na wskazanie, która z pierwotnych zmiennych jest najbardziej reprezentowana w tworzonym modelu. Jest to powszechnie stosowana technika nienadzorowanej ekstrakcji cech w przypadku posiadania próbek o nieznanej przynależności do klas [247, 248, 249].

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 [245]:

$$\text{var}(\mathbf{z}_1^T \mathbf{x}) = \max \left\{ \text{var}(\mathbf{a}^T \mathbf{x}) \right\}, \quad (5.1)$$

przy czym $\mathbf{a}$ oznacza dowolny wektor jednostkowy ($\|\mathbf{a}\|^2 = 1$). To znaczy, że poszukiwana jest standaryzowana kombinacja liniowa danych oryginalnych o możliwie największej wariancji. Druga składowa główna $\mathbf{z}_2$ wyznaczana jest z zależności [245], [246]:

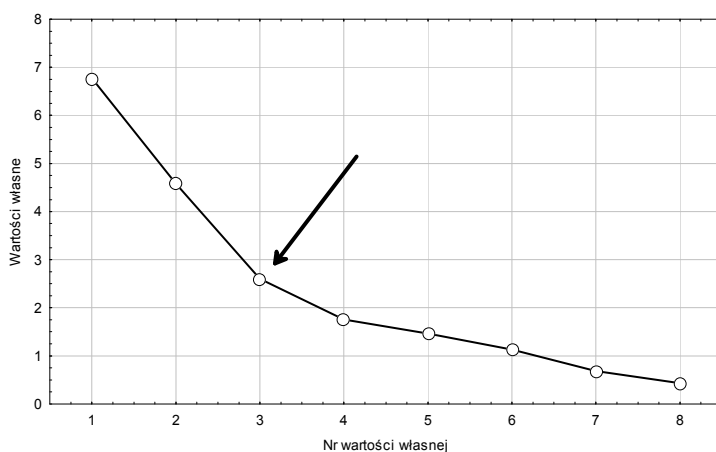
$$\text{var}(\mathbf{z}_2^T \mathbf{x}) = \max \left\{ \text{var}(\mathbf{a}^T \mathbf{x}) \right\}, \quad (5.2)$$

przy warunku:

$$\text{cov}(\mathbf{z}_1^T \mathbf{z}_2^T) = 0. \quad (5.3)$$

Czyli druga składowa główna ma możliwie największą wariancję, jeżeli nie jest skorelowana z pierwszą składową główną. W podobny sposób wyznaczane 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*) [244]. 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. 5.1. 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 [244]. Na przykładzie, z rysunku rys. 5.1 miejsce to zostało wskazane strzałką, a z testu osypiska wynika, że należy przyjąć trzy pierwsze składowe główne.



Rys. 5.1. 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:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{Z}^{(m)} \mathbf{A}^{(m)T}, \quad (5.4)$$

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:

$$R^2 X = 1 - \frac{\sum_{i,j} (x_{i,j} - \hat{x}_{i,j})^2}{\sum_{i,j} x_{i,j}^2}. \quad (5.5)$$

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

$$P = 1 - \frac{SV_j}{SV_j^0}, \quad (5.6)$$

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:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad (5.7)$$

przy czym: $\bar{x}_i, x_i$ oznacza odpowiednio pierwotny i przetworzony element zbioru danych, μ_i wartość średnią danych i -tej zmiennej, σ_i odchylenie standardowe danych i -tej zmiennej, a $i = 0 \dots n$.

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 [246]. 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 $\mathbf{X}$ zbiorem danych wstępnie przetworzonych $\bar{\mathbf{X}}$, zgodnie z zależnością (5.1), znalezienie składowych głównych następuje na podstawie wartości i wektorów własnych macierzy korelacji $\bar{\mathbf{X}}$.

5.2. Sztuczne sieci neuronowe

W systemach diagnostyki procesów sieci neuronowe mogą być stosowane do rozwiązywania problemów modelowania i klasyfikacji [53, 35]. Wśród wielu opracowanych architektur wyróżniają się sieci jednokierunkowe wielowarstwowe, sieci rekurencyjne i GMDH [250, 251, 252, 253].

Większość typów sieci neuronowych można zdefiniować jako układ prostych elementów przetwarzających – neuronów, połączonych ze sobą w sieć poprzez zbiór wag (synaptycznych). Funkcja realizowana przez sieć neuronową jest określona przez jej architekturę, wartości wag oraz funkcję realizowaną przez neurony.

Neuron lub węzeł jest elementem przetwarzającym, realizującym sumę ważoną wejść u_j , która następnie jest argumentem jednowymiarowej funkcji f zwanej funkcją aktywacji zgodnie ze wzorem [254, 255]:

$$y = f(h) = f\left(\sum_{j=1}^N u_j w_j + w_0\right), \quad (5.8)$$

gdzie y oznacza wyjście neuronu, a w_j oznacza wagi synaptyczne.

Podstawowymi zaletami sieci neuronowych są ich zdolność do uczenia się, adaptacji oraz do uogólniania.

5.2.1. Perceptron

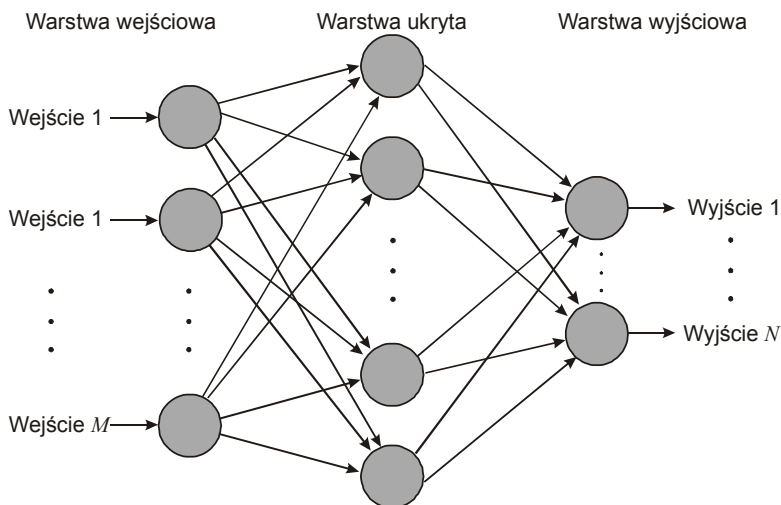
Neurony mogą być połączone ze sobą na wiele sposobów. Najbardziej popularną strukturą jest jednak perceptron wielowarstwowy – MLP (ang. *Multi-Layer Perceptron*). Sieć tego typu konstruowana jest poprzez łączenie neuronów w warstwy tak, że wejścia neuronów danej warstwy połączone są tylko z wyjściami neuronów warstwy poprzedniej a wejścia pierwszej warstwy z wejściami zewnętrznymi. Ostatnia warstwa jest nazywana warstwą wyjściową. Warstwy, które nie mają wejść i wyjść zewnętrznych nazywane są ukrytymi. Sieci tego typu są często nazywane również jednokierunkowymi [254, 255]. Matematycznie działanie sieci MLP można opisać następująco [53]:

$$\mathbf{y} = F_3(\mathbf{W}_3 F_2(\mathbf{W}_2 F_1(\mathbf{W}_1 \mathbf{u}))), \quad (5.9)$$

gdzie F_1, F_2, F_3 oznaczają funkcje realizowane przez kolejne warstwy perceptronu, $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3$ oznaczają wektory zawierające parametry sieci – wagi na poszczególnych warstwach, a $\mathbf{u}, \mathbf{y}$ to odpowiednio wektor wejściowy i wektor wyjściowy. Przykładowa sieć MLP pokazana jest na rys.5.2.

Do określenia wartości wag niezbędne są zbiory wartości wejściowych i odpowiadających im wartości wyjściowych. Procedura wyznaczania wag przy znanych obydwu zbiorach zwana jest treningiem lub uczeniem sieci z nauczycielem, które jest w zasadzie typowym zadaniem estymacji, gdzie wyznaczone są wagi, przy których zbiór wartości wyjściowych ma najmniejszy

błąd w stosunku do zbioru wzorcowego według określonego kryterium. Do uczenia sieci typu perceptron najczęściej używa się algorytmu wstecznej propagacji błędów [254, 255, 256].



Rys.5.2. Przykładowa struktura perceptronu trójwarstwowego o M wejściach i N wyjściach

Zanim rozpocznie się trenowanie sieci należy jeszcze rozważyć następujące zagadnienia:

- jakiego rodzaju zależności jest w stanie nauczyć się perceptron?
- ile powinno być warstw ukrytych i ile powinny posiadać neuronów?
- jakie funkcje aktywacji powinny posiadać neurony?

Niestety na żadne z tych pytań nie ma oczywistej odpowiedzi. Zostało wykazane, że każda funkcja ciągła może zostać aproksymowana z żadaną dokładnością, w sensie jednostajnej normy, przez sieć neuronową z jedną warstwą ukrytą zawierającą neurony z sigmoidalną lub hiperboliczną funkcją aktywacji i liniową warstwą wyjściową [257]. Istnieją rozważania dotyczące dokładności aproksymacji funkcji dostatecznie gładkiej za pomocą takiej sieci przy różnej liczbie neuronów ukrytych, lecz ich rezultaty trudno praktycznie zastosować do określenia rozmiaru warstwy ukrytej [258]. W zasadzie należy stwierdzić, że w większości przypadków nie jest celowe stosowanie architektury bardziej złożonej. Istnieje jednak pewna klasa funkcji, dla których sieci o większej liczbie warstw ukrytych lub sieci hybrydowe dają znaczne zwiększenie dokładności aproksymacji. Wybór zależy więc od wymaganej dokładności i uwarunkowań implementacyjnych. Uczenie sieci neuronowych jest niekiedy wspomagane algorytmami genetycznymi [259, 260, 261, 262].

W diagnostyce i automatyce sieci neuronowe typu MLP mają przede wszystkim zastosowanie do modelowania obiektów. Modelowanie układów dynamicznych wymaga modyfikacji statycznej struktury sieci poprzez dodanie linii opóźniających [254, 256, 53, 263]. Otrzymuje się w ten sposób neuronowe

odpowiedniki modeli o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR), czy też autoregresji i średniej ruchomej z zewnętrznym wejściem (ARMAX). W przypadku modeli ARMAX do struktury sieci wprowadzane jest sprzężenie zwrotne, przez co sieć jednokierunkowa staje się siecią rekurencyjną.

5.2.2. Klasyfikatory Kohonena

Sieć Kohonena została nazwana przez jego twórcę samoorganizującym odwzorowaniem (cech) (ang. *Self-Organizing (Feature) Map – SO(F)M*). W odróżnieniu do sieci typu perceptron, uczenie następuje na zasadzie konkurencyjnej, tzn. istnieją jedynie wzorce wejściowe, brak jest natomiast wzorców wyjścia. Zadaniem sieci w trakcie procesu uczenia jest wytworzenie takich wzorców. Sieć ma na celu utworzenie takiej struktury, która w najlepszy sposób będzie odwzorowywała zależności w przestrzeni wektorów wejściowych. Taki sposób uczenia zwany uczeniem bez nadzoru jest możliwy tylko wtedy, gdy istnieje nadmiar danych uczących i wiadomo, że istnieje pewien nieznany wzorec uporządkowania tych danych.

Sieć jest zwykle jednokierunkowa, neurony warstwy wejściowej i warstwy konkurencyjnej – wyjściowej są połączone w sposób zupełny. Przykładową strukturę dwuwymiarowej mapy cech pokazana jest na rys.5.3. Wagi sieci w_{ij} są adaptowane zgodnie z regułą, w której wektor wag neuronu zwycięskiego $\mathbf{w}_c(k)$ najmniej różni się od odpowiednich składowych wektora wejściowego $\mathbf{u}(k)$:

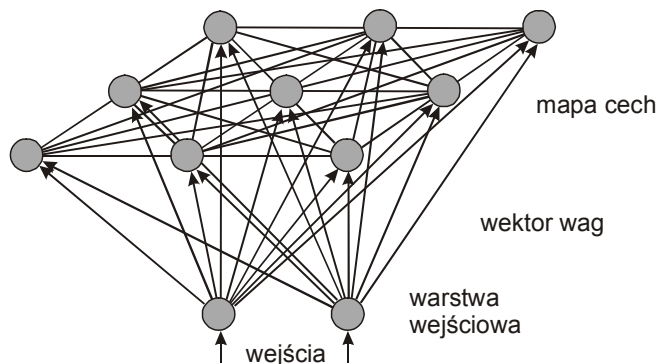
$$\|\mathbf{u}(k) - \mathbf{w}_c(k)\| = \min_i \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{w}_i(k)\|, \quad (5.10)$$

gdzie $\mathbf{w}_i(k)$ jest wektorem wag i -tego neuronu. Reguła taka została nazwana „zwycięzca bierze wszystko” (ang. *winner takes all*) [264].

W sieci Kohonena oprócz adaptacji wag neuronu zwycięzcy dostrajane są współczynniki wagowe neuronów wewnątrz pewnego sąsiedztwa Ω tego neuronu, zgodnie z regułą:

$$\mathbf{w}_i(k+1) = \begin{cases} (1-\alpha)\mathbf{w}_i(k) + \alpha\mathbf{u}_i(k), & i \in \Omega \\ \mathbf{w}_i(k), & i \notin \Omega \end{cases} \quad (5.11)$$

gdzie α jest krokiem uczenia, który monotonicznie maleje z każdą epoką. Często stosuje się funkcje $\alpha(t) = 1/t$ lub $\alpha(t) = at^{-\alpha}$ dla $a \in (0,1)$. Na początku uczenia każdej klasie danych wejściowych przyporządkowywane są pewne zbiory elementów wyjściowych, wraz ze zmniejszaniem się kroku uczenia następuje precyzowanie wag w poszczególnych obszarach tych zbiorów. W oryginalnym algorytmie Kohonena zdefiniowano sąsiedztwo prostokątne obecnie częściej spotyka się funkcję sąsiedztwa w postaci gaussowskiej lub tzw. kapelusza meksykańskiego.



Rys.5.3. Przykładowa struktura dwuwymiarowej mapy cech o dwóch wejściach i dziewięciu wyjściach

O stopniu adaptacji neuronów z sąsiedztwa zwycięzcy decyduje odległość euklidesowa oraz promień sąsiedztwa. Przy sąsiedztwie gaussowskim stopień adaptacji jest zróżnicowany w przeciwieństwie do sąsiedztwa prostokątnego, gdzie każdy neuron podlega adaptacji w tym samym stopniu i zależy od funkcji Gaussa. Sąsiedztwo gaussowskie jest lepsze i prowadzi do lepszych rezultatów uczenia i lepszej organizacji sieci [256], [255].

Aby móc określić, która odległość jest najmniejsza należy dobrać odpowiednią metrykę, w jakiej mierzona będzie odległość między wektorem $\mathbf{u}$ a wektorem $\mathbf{w}$. Najczęściej używa się [255]:

- - miary euklidesowej

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{w}_i\| = \sqrt{\sum_j (\mathbf{u}(j) - \mathbf{w}_i(j))^2}, \quad (5.12)$$

- - iloczynu skalarnego

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{w}_i\| = \mathbf{u} \cdot \mathbf{w}_i = \|\mathbf{u}\| \|\mathbf{w}_i\| \cos(\mathbf{u}, \mathbf{w}_i), \quad (5.13)$$

- - miary według normy L_1 (Manhattan)

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{w}_i\| = \sqrt{\sum_j |\mathbf{u}(j) - \mathbf{w}_i(j)|}, \quad (5.14)$$

- - miary według normy L_∞

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{w}_i\| = \max_j |\mathbf{u}(j) - \mathbf{w}_i(j)|. \quad (5.15)$$

Szczególnością odmianą uczenia konkurencyjnego jest uczenie z forsowaniem. Pozwala ono na wykorzystanie metody Kohonena także w przypadku, kiedy wektor wymaganych wartości sygnałów wyjściowych sieci jest znany. Takie uczenie ma charakter „forsowania” poprawnych rozwiązań bez względu na to,

co robi sieć. Metoda ta w sposób jawny nie wymaga wyliczenia wartości błędów popełnianych przez neurony sieci, co może bardzo istotnie przyspieszyć proces uczenia [255].

W diagnostyce sieci Kohonena znalazły zastosowanie do klasyfikacji. W rozdziale 6.1.2 opisana jest opracowana przez autora metoda diagnostyki płomienia gazowego z wykorzystaniem sieci Kohonena jako klasyfikatora.

5.3. Logika rozmyta

W opisywanych do tej pory sposobach modelowania wykorzystywana była logika bazująca na dwóch wartościach reprezentowanych najczęściej przez 0 i 1. Spełnia ona następujący warunek:

$$\begin{aligned}\forall_p : p \wedge \bar{p} &= \emptyset \\ \forall_p : p \vee \bar{p} &= 1\end{aligned}\tag{5.16}$$

Oznacza to, że granica między wartościami jest jednoznacznie określona i niezmienna.

Logika rozmyta stanowi rozszerzenie klasycznego rozumowania na bliższe ludzkiemu. Wprowadza ona wartości pomiędzy standardowe 0 i 1; „rozmywa” granice pomiędzy nimi dając możliwość zaistnienia wartościom z pomiędzy tego przedziału (np.: gorszy, dobry, lepszy).

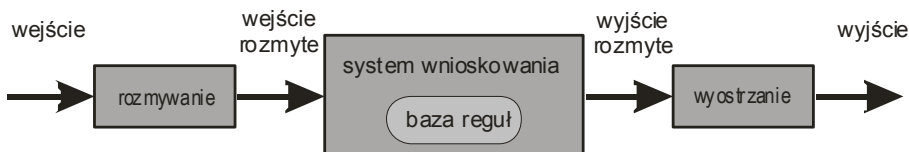
$$\begin{aligned}\exists_p : p \wedge \bar{p} &\neq \emptyset \\ \exists_p : p \vee \bar{p} &\neq 1\end{aligned}\tag{5.17}$$

Podstawy teorii zbiorów rozmytych przedstawione są w [265, 266, 267]. Dostępne są również monografie w języku polskim [268, 269, 270, 271, 272, 273, 274]. Logika rozmyta jest narzędziem na tyle dojrzałym, że doczekała się bardzo obszernego opracowania szczegółowo dyskutującego różne podejścia i zastosowania systemów rozmytych [275].

W diagnostyce logika rozmyta wykorzystywana jest głównie do konstrukcji modeli. Stanowi ona alternatywę dla modeli analitycznych, zwłaszcza tam, gdzie działanie systemu daje się przedstawić w postaci reguł „jeśli – to”. Możliwe jest również zastosowanie systemów rozmytych bezpośrednio do klasyfikacji stanów [49, 50] lub do lokalizacji uszkodzeń na podstawie residuów [53]. Opisano już wiele technik modelowania zarówno opartych wyłącznie na wiedzy empirycznej, np. modele Wanga i Mendela [276], jak i łączących modelowanie rozmyte i analityczne np. mechanizm wnioskowania Takagi-Sugeno-Kang (TSK) [277, 278] implementowany w postaci rozmytej sieci neuronowej [279].

Ogólna struktura modelu rozmytego pokazana jest na rys. 5.4. Ostre (nierozmyte) wartości wejściowe poddawane są rozmywaniu polegającym na zdefiniowaniu stopnia przynależności poszczególnych wejść do określonych

zbiorów rozmytych. W praktyce najczęściej stosowane są funkcje przynależności $\mu_A(x)$ typu gaussowskiego oraz funkcje trójkątne, rzadziej trapezoidalne. Po przeprowadzeniu wnioskowania w oparciu o bazę reguł następuje wyostrzanie za pomocą metod, z których najbardziej znane to: metoda środka sum, metoda środka ciężkości oraz metoda średniej wartości centrów.



Rys. 5.4. Schemat modelu rozmytego

Najczęściej stosowaną jest gaussowska funkcja przynależności. Przekształca ona N -wymiarowy wektor wejściowy x w zbiór rozmyty A i definiowana jest następująco:

$$\mu_A(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (5.18)$$

gdzie x jest zmienną o centrum w c i szerokości σ .

Jedna z prostszych rozmytych sieci neuronowych posiada wyjście w postaci singletonu. Dla N zmiennych wejściowych postać reguły jest następująca:

$$\text{jeżeli } x_1 \text{ jest } A_1^{(j)} \text{ I... I } x_N \text{ jest } A_N^{(j)} \text{ to } y_j = f^{(j)}(x_1 \dots x_N), \quad (5.19)$$

gdzie j jest numerem reguły ($j = 1, 2, \dots, M$), M – liczba reguł.

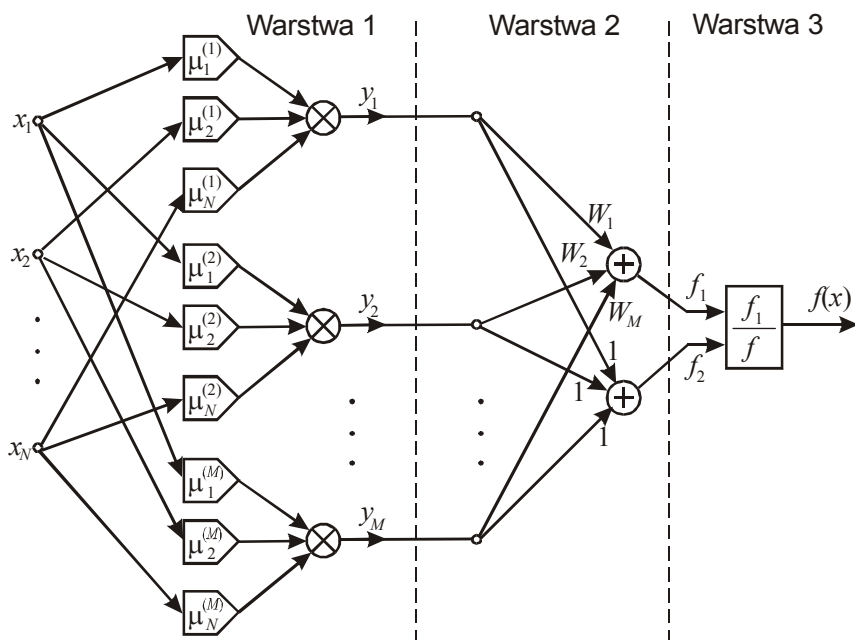
W modelach rozmytych często stosowana jest reguła Larsena (reguła typu iloczynowego), w której wartość τ_k oznaczająca stopień aktywności k -tej reguły rozmytej definiowana jest jako:

$$\tau_k = \prod_{i=1}^N \mu_{A_i^k}. \quad (5.20)$$

Funkcja aproksymująca przyjmuje więc postać:

$$f(x) = \frac{\sum_{k=1}^M w_k \tau_k}{\sum_{k=1}^M \tau_k} = \frac{\sum_{k=1}^M w_k \prod_{i=1}^N \exp \left[- \left(\frac{x_i - c_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right]}{\sum_{k=1}^M \prod_{i=1}^N \exp \left[- \left(\frac{x_i - c_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right]}, \quad (5.21)$$

gdzie w_k to wagi sieci wyostrzającej. Na rys. 5.5 pokazano schemat struktury neuronowej sieci rozmytej zdefiniowanej wg powyższych równań.



Rys. 5.5. Schemat struktury neuronowej sieci rozmytej [53]

5.4. Sztuczne systemy immunologiczne

Immunologia jest nauką z pogranicza medycyny i biologii, której przedmiotem badań jest odporność organizmów na zarazki, toksyny i niektóre substancje chemiczne. Chęć zrozumienia makroskopowych własności układu odpornościowego zrodziła powstanie odrębnej jej gałęzi – immunologii matematycznej. Układ odpornościowy jako efektywny system rozproszonego przetwarzania informacji, posiadający zdolność uczenia się i adaptacji do zmiennego otoczenia jest atrakcyjny także i dla informatyków [279].

Sztuczne systemy immunologiczne w rozumieniu de Castro i Timmis [280] to „systemy adaptacyjne inspirowane przez immunologię teoretyczną i obserwacje funkcji zasad i modeli immunologicznych, które są stosowane do rozwiązywania zadań”. System odpornościowy jest złożonym układem biologicznym dysponującym szybkimi i efektywnymi mechanizmami obrony organizmu przed działaniem obcych struktur zwanych antygenami. System rozpoznaje własne struktury, wszystkie inne są traktowane jako antygeny. Podczas pierwotnej reakcji immunologicznej, adaptacyjny układ odpornościowy zapamiętuje charakterystykę napotkanego antygeny poprzez produkcję komórek osocza lub komórek pamięci. Taka pamięć sprzyja szybkiej reakcji (wtórną) układu immunologicznego w przypadku przyszłej ekspozycji na ten sam antygen [281].

Podstawowymi składnikami warstwy adaptacyjnej systemu immunologicznego są limfocyty B i T. Zarówno limfocyty B i T, jak również antygeny, wyposażone są w trójwymiarowe struktury chemiczne otaczające ich powierzchnię [282]. W przypadku antygeny, taka struktura jest jednocześnie fragmentem jego powierzchni, który określany jest jako epitop. Różne antygeny posiadają różną strukturę epitopów, odzwierciedlających ich strukturę molekularną. Limfocyty B są otoczone przez zespół receptorów (detektorów), określanych również jako przeciwciała. Na przeciwciele znajduje się struktura, nazywana paratopem, pozwalającą na dopasowanie do epitopów antygeny, posiada ono również własne epitopy. Siła wiązania paratopów do epitopów, określana jako stopień dopasowania (ang. *affinity*) [279, 281, 282].

Sztuczne systemy immunologiczne w rozumieniu de Castro i Timmis [280] to „systemy adaptacyjne inspirowane przez immunologię teoretyczną i obserwacje funkcji zasad i modeli immunologicznych, które są stosowane do rozwiązywania zadań”. Nie jest to jedyny rodzaj algorytmów inspirowanych systemy biologiczne, podobnie powstały sieci neuronowe, algorytmy ewolucyjne czy roju cząstek. Powstało już wiele różnych rodzajów algorytmów immunologicznych, dotychczasowe badania skupiają się głównie na teorii sieci immunologicznych, selekcji klonalnej oraz selekcji negatywnej. Teorie te są implementowane w postaci różnych algorytmów i stosowane w różnych dziedzinach, takich jak wykrywanie anomalii, rozpoznawanie wzorców, uczenie i robotyka. Autor proponuje ich zastosowanie do diagnostyki procesu spalania.

5.4.1. Algorytm selekcji negatywnej

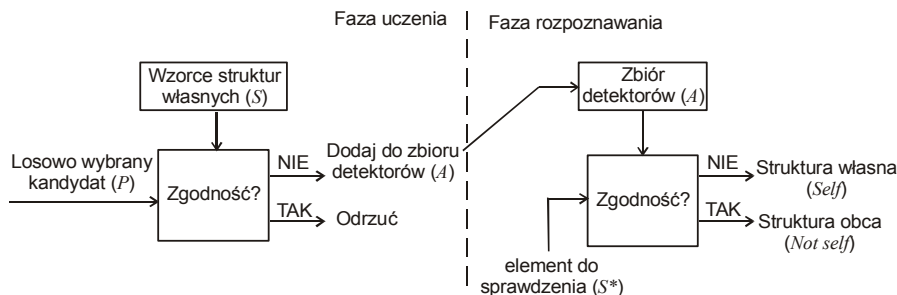
Algorytm selekcji negatywnej po raz pierwszy został użyty do rozwiązania problemów bezpieczeństwa komputerów [283]. Modelowane są limfocyty typu T, reprezentowane jako ciąg bitów o długości L . Oryginalny algorytm zaproponowany przez Stefanię Forrest jest stosunkowo prosty [283]. Mając pewien zbiór peptydów „własnych” S testuje się stopień dopasowania wszystkich osobników populacji względem wszystkich wzorców ze zbioru S . Jeżeli limfocyt rozpoznaje osobnika jako „własnego” jest odrzucany, w przeciwnym wypadku jest dodawany do wynikowej populacji detektorów A . Detektory używane są następnie do sprawdzania nieznanej populacji S^* i binarnej klasyfikacji na „własne” i „obce” [283]. Graficzna reprezentacja takiego algorytmu jest pokazana na rys. 6.21.

Formalnie algorytm selekcji negatywnej może być zapisany następująco [284, 285, 286]:

$$NegAlg = \left(\Sigma^L, L, S, N, r, n, s, pr \right), \quad (5.22)$$

gdzie Σ^L oznacza przestrzeń kształtów, L długość receptora, S zbiór detektorów struktur „własnych”, N zbiór detektorów struktur „obcych”, r próg reakcji, n całkowitą liczbę detektorów, s licznosc zbioru detektorów, pr – zasada

wiążącą odpowiadające sobie pozycje. Jego działanie definiuje się następująco: dla danej przestrzeni kształtów Σ^L i danego zbioru struktur własnych $S \subset \Sigma^L$ znajduje się zbiór struktur obcych $N \subset \Sigma^L$, będący dopełnieniem $N = \Sigma^L \setminus S$, takim że $\Sigma^L = S \cup N$ i $S \cap N = \emptyset$.



Rys. 5.6. Algorytm selekcji negatywnej [287]

Algorytmu selekcji negatywnej nie może być stosowany w przypadkach, gdy liczność zbioru struktur własnych jest mała [287].

5.4.2. Algorytm selekcji klonalnej

Algorytm selekcji klonalnej jest realizacją mechanizmu, mającego na celu adaptację zdolności immunologicznych. Własności adaptacyjne decydują o wykorzystaniu tego mechanizmu w realizacji różnych systemów obliczeniowych, których działanie opiera się na takiej ewolucji potencjalnych rozwiązań, aby dopasować je do określonego celu. Ponadto zastosowanie w tym algorytmie mechanizmu hipermutacji somatycznej (mutacji o wysokim współczynniku) gwarantuje zachowanie odpowiedniej różnorodności przeciwciał, a co za tym idzie bardziej efektywne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań [279]. Algorytm selekcji klonalnej (CLONALG) składa się z dwóch etapów – ekspansji klonalnej oraz hipermutacji. Pierwszy odpowiedzialny jest za wyselekcjonowanie najlepiej dopasowanych przeciwciał i ich sklonowanie. Hipermutacja realizuje dojrzewanie przeciwciał w celu jeszcze lepszego ich dopasowania. Schemat algorytmu przedstawia się w następujących krokach [280]:

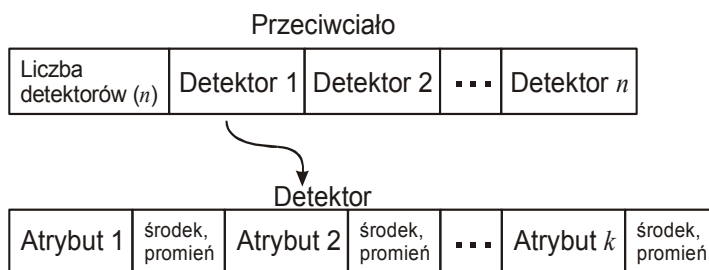
1. generacja populacji początkowej przeciwciał,
2. selekcja przeciwciał z najlepszym dopasowaniem,
3. Klonowanie przeciwciał w ilości proporcjonalnej do stopnia dopasowania,
4. Hipermutacja przeciwciał z czynnikiem zmienności odwrotnie proporcjonalnym do stopnia dopasowania,
5. Ponowny wybór najlepiej dopasowanych przeciwciał,
6. Wymiana najgorzej dopasowanych przeciwciał na nowe.

Specyfika algorytmu klonalnej polega na tym, że w przeciwieństwie do sieci immunologicznej utrzymuje on stałą wielkość populacji przeciwciał.

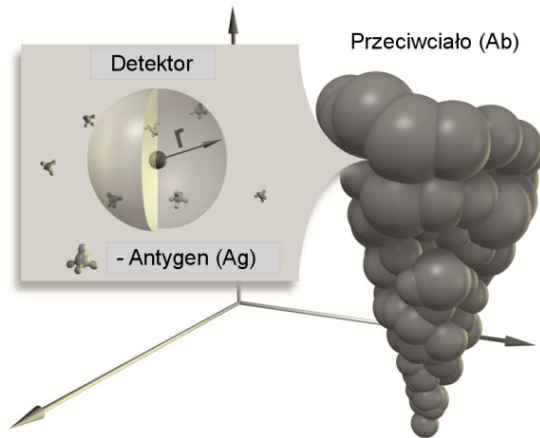
5.4.3. Algorytm negatywnej selekcji klonalnej

Pewne ograniczenia klasycznego algorytmu selekcji negatywnej zostały już dobrze poznane. Nie powinno się go stosować, na przykład, gdy zbiór struktur własnych jest mało liczny. Istnieje również szereg ograniczeń związanych z reprezentacją danych. Ponieważ generowania zbioru detektorów w fazie uczenia następuje w sposób przypadkowy nie jest z góry możliwe określenie minimalnej liczby detektorów, które zapewnia maksymalną jakość rozpoznawania. Z drugiej strony kanoniczna postać algorytmu selekcji negatywnej [283, 288, 289] zakłada, że wszystkie detektory mają z góry zadany niezmienny próg reakcji (ang. *cross-reactive threshold*). Powoduje to rozmycie granicy rozdzielającej elementy własne i obce. Wzrost liczby detektorów (z mniejszym progiem) prowadzi do opóźnień w fazie rozpoznawania, a jej ograniczenie – do pogorszenia pracy algorytmu w związku ze wzrostem prawdopodobieństwa powstawania „dziur” w przestrzeni ciał obcych, które nie są wykrywane przez żaden detektor. Należy więc wypracować takie metody generacji detektorów, które byłyby zdolne do adaptacyjnego wyboru ich opcji, ilości i rozmieszczenia, aby zapewnić maksymalny poziom detekcji ciał obcych.

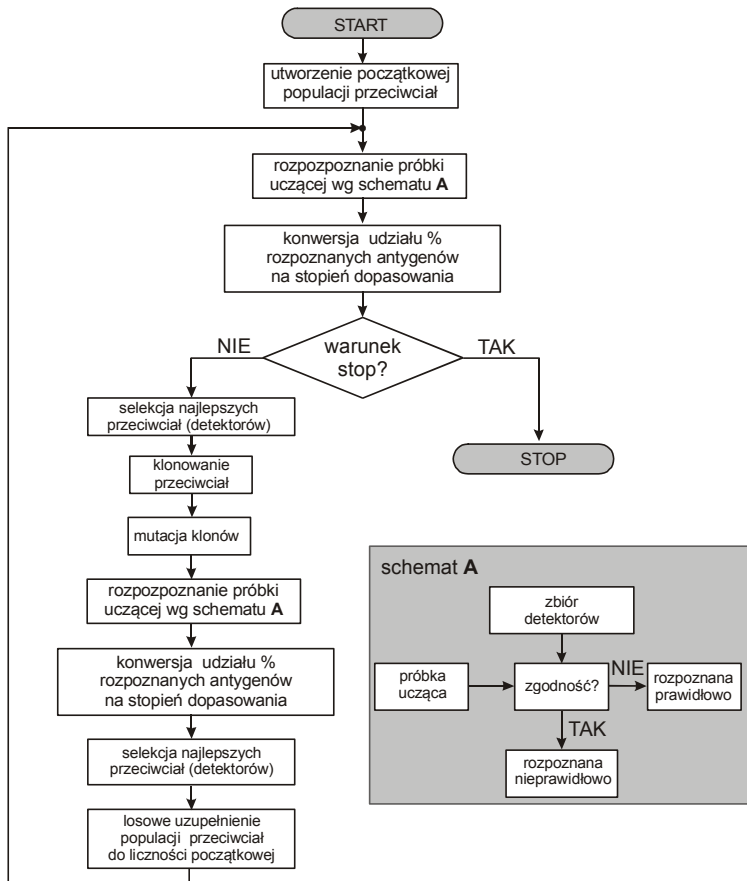
Została zaproponowana modyfikacja [284, 285, 286, 290], w której próg reakcji nie jest już wielkością stałą. Optymalizacja rozmieszczenia detektorów ciał obcych i progu reakcji tak, aby zapewnić maksymalne wypełnienie przestrzeni jest dokonywana za pomocą algorytmu selekcji klonalnej. Powstał w ten sposób hybrydowy algorytm negatywnej selekcji klonalnej. Strukturę przeciwciała w tym algorytmie przedstawiono na rys. 5.7 natomiast na rys. 5.8 graficzną reprezentację przeciwciała i detektora. Atrybutami są współrzędne środka detektora i jego promień – próg reakcji. Każde przeciwciało koduje więc jedno z możliwych rozmieszczeń detektorów w przestrzeni potencjalnych struktur obcych. Proponowany algorytm negatywnej selekcji klonalnej przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.7. Struktura przeciwciała w algorytmie negatywnej selekcji klonalnej



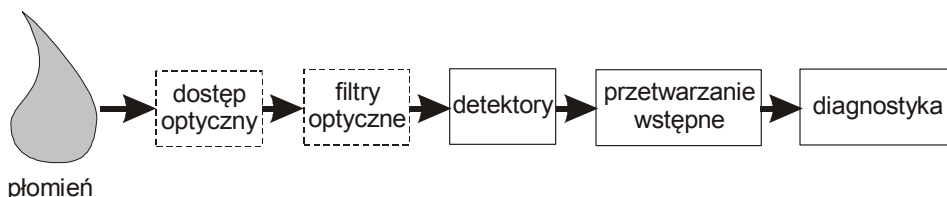
Rys. 5.8. Graficzna reprezentacja przeciwciała i detektora w algorytmie negatywnej selekcji klonalnej



Rys. 5.9. Algorytm negatywnej selekcji klonalnej

6. Diagnostyka płomienia

Znakomita większość metod diagnostycznych procesu spalania opiera się na wnioskowaniu pośrednim, na podstawie pomiaru wielkości procesowych. Jednocześnie sterowanie i diagnostyka dotyczy coraz mniejszych części systemu. Wymaga to zastosowania nowych metod zarówno pomiarowych, jak i diagnostycznych. W rozdziale będzie opisana diagnostyka płomienia bazująca na optycznych metodach pomiaru i przetwarzaniu z wykorzystaniem sztucznej inteligencji opisywanych w rozdziale 5. Schemat blokowy takiego systemu pokazano na rys. 6.1. Optyczny dostęp do płomienia może być realizowany za pomocą światłowodu lub, jeżeli pozwala na to konstrukcja palnika, przez wolną przestrzeń. Przed fotodetektorem mogą być umieszczane filtry optyczne – stałe, przestrajane lub siatka dyfrakcyjna w przypadku spektrometrów. Do detekcji promieniowania użyte mogą być fotodiody, fotopowielacze, matryce fotodiod lub przetworniki obrazu (CCD, CMOS itp.). Przetwarzanie wstępne polega na wyznaczeniu cech sygnału, które są istotne z punktu widzenia diagnostyki lub sterowania. W najprostszym przypadku jest to średni poziom sygnału w danym przedziale czasowym.



Rys. 6.1. Schemat blokowy systemu diagnostycznego płomienia z wykorzystaniem metod optycznych

Znakomita większość współcześnie stosowanych optycznych metod diagnostyki płomienia ogranicza się tylko do wykrywania jego obecności bądź braku na podstawie całkowitej intensywności promieniowania płomienia (np. [291]), metody te mają wadę polegającą na tym, że nie potrafią rozróżnić promieniowania płomienia od promieniowania gorących elementów kotła. Wadę tą eliminują metody wykorzystujące składową zmienną promieniowania, której wartość jest wysoka dla płomienia, a niska dla gorących elementów kotła oraz jądra płomienia w kotle (np. [40, 292]). W bardziej zaawansowanych metodach do diagnostyki płomienia wykorzystywana jest znacznie większa liczba cech optycznej emisji płomienia. W publikacjach opisuje się między innymi czujniki wąskopasmowe [215, 225, 293, 294, 295, 296, 297, 56, 298] i szerokopasmowe, [299, 39, 300, 38, 142, 49, 301, 302], pracujące w zakresie ultrafioletu [215, 225, 293, 294, 295, 296, 297, 56], światła widzialnego [56, 299, 39, 49], podczerwieni [39, 49] lub obejmujące kilka z nich [215, 225, 142, 301, 26]. Niektórzy autorzy wykorzystali sygnał konwencjonalnych detektorów

plomienia, bez szukania konkretnego zakresu widma [303, 304, 305]. Bardzo różne podejścia są stosowane do powiązania sygnałów optycznych z istotnymi parametrami spalania, w tym ze stechiometrią płomienia [215, 225, 293, 294, 296, 297, 39, 38, 142], z emisjami zanieczyszczeń [215, 294, 56, 298, 299, 39, 300, 142, 301, 302], stabilnością [61, 323, 328, 331, 332], właściwościami paliwa [215, 49], warunkami pracy [39, 300, 26, 304, 305] lub stanami awaryjnymi [39, 304, 305]. Optyczne dane są przetwarzane tak, aby wyodrębnić wybrane cechy czasowe sygnału promieniowania, jak średnia intensywność (wykorzystywana w większości cytowanych źródeł), odchylenie standardowe [215, 56, 298, 142, 26], charakterystyczne częstotliwości [49, 301, 302, 303] lub inne parametry związane z częstotliwością [300, 38, 49, 301, 304, 305].

6.1. Diagnostyka płomienia gazowego

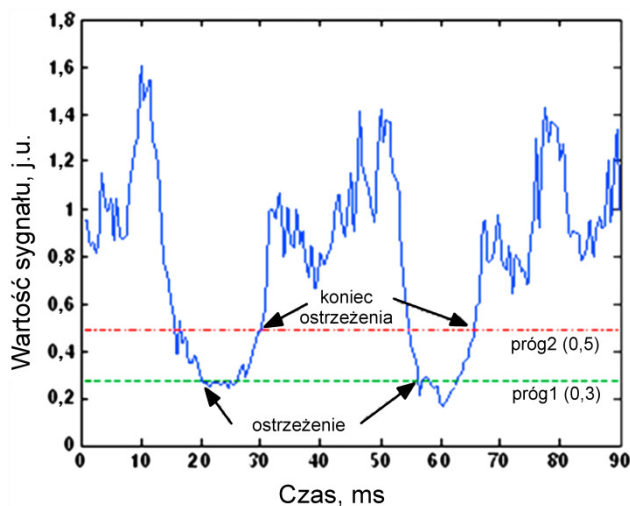
Ponieważ, z uwagi na emisję zanieczyszczeń, spalanie przeprowadza się w warunkach ubogich w płomieniu praktycznie nieobecne są cząstki sadzy. W diagnostyce płomienia gazowego wykorzystuje się więc przede wszystkim chemiluminescencję.

6.1.1. Niestabilność procesu spalania

Niestabilność płomienia pojawiająca się szczególnie w przypadku mieszanek ubogich może doprowadzić do niebezpiecznych warunków pracy lub nawet do zdmuchnięcia płomienia. Może ona wynikać z dynamiki przepływu i interakcji pomiędzy zawirowaniami i płomieniem. Drugim powodem niestabilności jest zjawisko termoakustyczne – sprzężenie fluktuacji wydzielania ciepła ze zmianami ciśnienia [307, 308, 309]. Oprócz tradycyjnego postulatu Rayleigha [310] i kilku nowych formuł (np. [311]), wciąż nie ma wiarygodnego kryterium przewidywania wzbudzania się oscylacji płomienia.

Jak wspomniano wcześniej, chemiluminescencja może być wykorzystywana bezpośrednio do detekcji obecności płomienia. Może ona być również wykorzystywana do detekcji niestabilności lub oderwania się płomienia gazowego. Jest to przede wszystkim technika bardzo szybka – Roby i inni [312], wykorzystując emisję OH^* i CH^* , uzyskiwali czasy detekcji poniżej 2ms.

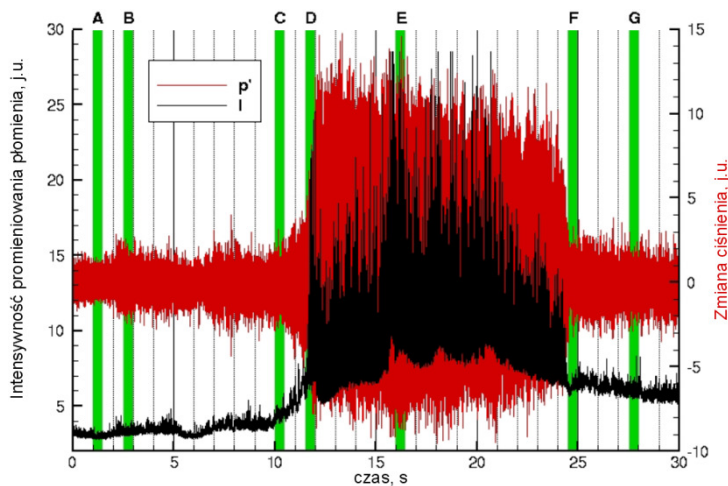
Muruganandam i inni [313, 314] diagnozowali ryzyko zdmuchnięcia płomienia poprzez detekcję „prekursorów zdmuchnięcia” przy spalaniu ubogiej mieszanki. Na rys. 6.2 wyjaśniony jest sposób diagnozowania. Przy spadku sygnału OH^* poniżej poziomu 0,3[a.u.] generowane jest ostrzeżenie o możliwości zgaśnięcia i kasowane przy wzroście sygnału OH^* powyżej 0,5[a.u.]. Użycie dwóch progów (histerezy) zwiększa odporność na szum. Oprócz diagnostyki sposób ten został użyty w układzie sterowania.



Rys. 6.2. Zapis przebiegu sygnału OH* i wyjaśnienie sposobu diagnozowania możliwości zdmuchnięcia płomienia [314]

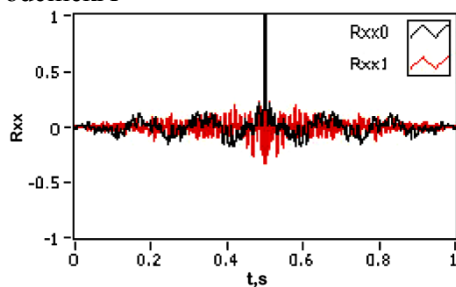
Bruschi i inni [306] wykazali, że powszechnie przyjmowane założenie, iż prekursorami niestabilności są okresowe piki z amplitudą rosnącą przy zbliżaniu się do obszaru niestabilnego nie zawsze jest słuszne. Autorzy równocześnie zaproponowali, że takim wskaźnikiem może być wzrost znormalizowanej (względem powierzchni) autokorelacji sygnału promieniowania płomienia. Do wykrywania niestabilności był wykorzystywany sygnał pochodzący od emisji płomienia leżącej w całym zakresie widmowym czułości diody krzemowej. Na rys. 6.3 pokazane są przebiegi czasowe sygnału ciśnienia i promieniowania optycznego podczas jednego z doświadczeń wykonywanych na stanowisku 250kW w Savona Combustion Laboratory (Savona, Włochy). Zaznaczone na zielono półsekundowe odcinki odpowiadają następującym stanom przy zwiększeniu a następnie zmniejszeniu przepływu paliwa:

- A – spalanie stabilne,
- B – spalanie niestabilne bez zmiany temperatury,
- C – spalanie niestabilne ze zmianą temperatury (dryft),
- D – szybki wzrost niestabilności,
- E – rezonans akustyczny – „buczenie” płomienia,
- F – szybka stabilizacja,
- G – spalanie stabilne.

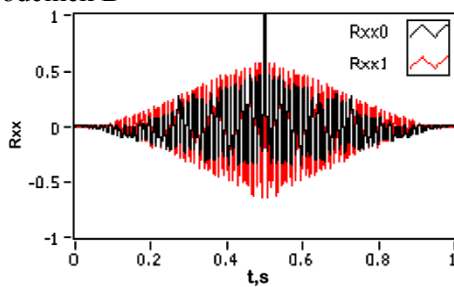


Rys. 6.3. Przebiegi czasowe sygnału fluktuacji ciśnienia (czerwony) i promieniowania optycznego (czarny) dla różnych warunków spalania [306]

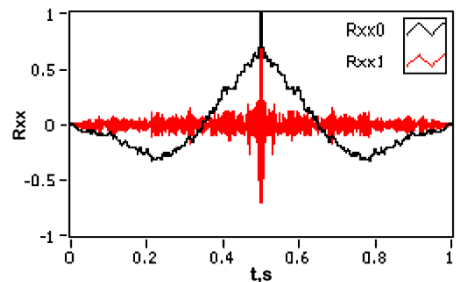
odcinek A



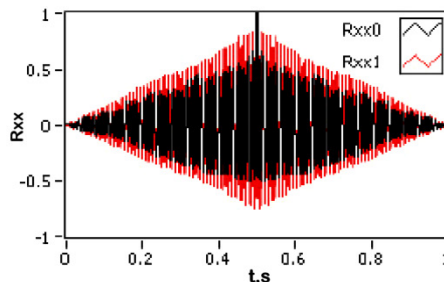
odcinek B



odcinek C



odcinek E



Rys. 6.4. Funkcje autokorelacji dla odcinków A, B, C i E z rys. 6.2, kolor czerwony – sygnał ciśnienia, czarny – sygnał optyczny [306]

Jak widać różnica w amplitudzie i charakterze przebiegów spalania stabilnego (A) oraz początków niestabilności (B i C) jest niewielka. Jednakże, jeżeli porówna się funkcje autokorelacji sygnałów (rys. 6.4) to okazuje się, że dla sygnału A jest ona bardzo mała, natomiast dla sygnałów B i C znacznie większa (przynajmniej rząd wielkości). Dodatkowo widoczna jest przewaga

metody optycznej, gdyż w przypadku odcinka C autokorelacja sygnału optycznego jest niezerowa natomiast sygnału akustycznego podobna jak dla sygnału przy braku niestabilności.

6.1.2. Klasyfikacja rodzaju płomienia

W przemysłowych palnikach gazowych najczęściej wykorzystuje się płomień kinetyczno-dyfuzyjny. Palnik powinien charakteryzować się stabilnym spalaniem w szerokim zakresie mocy. Zapewniane jest to przez zawirowanie strumienia paliwa i powietrza. Niestabilności powstają przy małych obciążeniach, kiedy niskie przepływy nie powodują już tak silnych zawirowań. Jednocześnie silne zawirowanie przy małych mocach powoduje niestabilności w zakresie wyższych mocy.

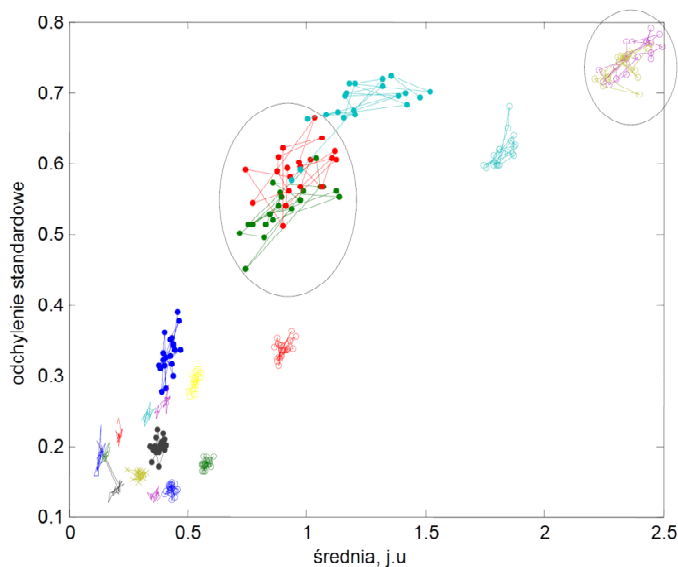
Celem badań autora była optymalizacja ustawienia zawirowywaczy oraz sprawdzenie możliwości odróżnienia różnych płomieni na podstawie parametrów sygnału optycznego. Dawałoby to możliwość diagnostyki prawidłowości spalania gazowego płomienia dyfuzyjnego.

Testy zostały przeprowadzone w LITEC (Laboratorium Badania Technologii Spalania), Saragossa, Hiszpania. Cylindryczna, pionowa komora spalania o średnicy wewnętrznej 400mm, długości 800mm o mocy 100kW_{th} jest chłodzona wodą. Została specjalnie zaprojektowana, aby umożliwić dostęp optyczny do strefy reakcji i monitorowanie płomienia za pomocą kamery. U podstawy komory znajduje się przewód spalinowy. W górnej części zamontowany jest przemysłowy palnik na gaz ziemny. Palnik posiada współosiowe dysze powietrza i gazu z regulowanym stopniem zawirowania [315]. Zmieniano trzy parametry procesu spalania: zawirowanie powietrza pierwotnego i wtórnego oraz stosunek powietrza pierwotnego (kinetycznego) i wtórnego (dyfuzyjnego). Zbadano razem 20 płomieni. Część z nich była stabilna, część w różnym stopniu niestabilna inne ewoluowały w stronę płomieni niestabilnych dopiero po pewnym czasie.

Aby zbadać możliwości odróżnienia różnych płomieni na podstawie parametrów sygnału optycznego płomienie były obserwowane za pomocą różnych czujników optycznych fotopowielacza, fotodiody krzemowej i kamery CCD. Do dalszego przetwarzania wybrano sygnał intensywności chwilowej z fotopowielacza próbkowany z częstotliwością 2kHz. Dalsza obróbka polegała na obliczeniu wartości średniej i odchylenia standardowego w oknach 1s. Na rys. 6.5 przedstawiono wykres rozrzutu dla wszystkich 20 badanych wariantów. Widoczne są dwa obszary niepewności, które odpowiadają małym zmianom zawirowania powietrza pierwotnego i wtórnego.

Do klasyfikacji płomieni zastosowane zostały samoorganizujące się sztuczne sieci neuronowe. Ich działanie zostało opisane w rozdziale 5.2.2. W tym przypadku została wybrana topologia sześciokątna i euklidesowa funkcja odległości. Rozmiar sieci to 3×7 neuronów – dobrany ze względu na fizyczne znaczenie danych (zmieniane są 3 parametry, a maksymalna liczba płomieni dla

danej konfiguracji w zestawie danych treningowych wynosi 7). Sieć była trenowana według reguły Kohonena.



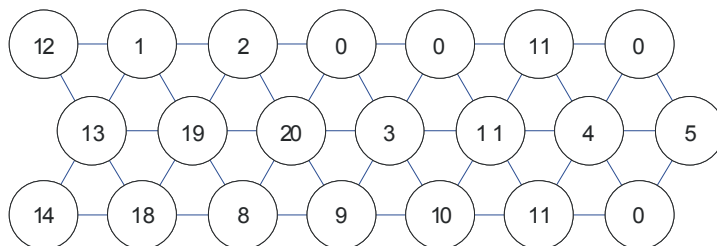
Rys. 6.5. Wykres rozrzutu dla wartości średniej i odchylenia standardowego sygnału intensywności w oknach 1s [315]

Tabela 6.1. Rezultaty klasyfikacji wzorców płomieni

neuron	płomień	prawdopodobieństwo	neuron	płomień	prawdopodobieństwo
1	14	0,25	11	3	0,74
2	18	1	12	11	0,42
3	8	0,71	13	4	1
4	9	1	14	5	0,5
5	10	0,54	15	12	0,71
6	11	1	16	1	0,8
7	0	0	17	2	1
8	13	1	18	0	0
9	19	0,6	19	0	0
10	20	1	20	11	1
			21	0	0

Tabela 6.1 zawiera rezultaty treningu sieci – przyporządkowanie wzorca płomienia do określonego neuronu. Sieć została sprawdzona za pomocą osobnego zbioru danych testowych. Prawdopodobieństwo prawidłowej klasyfikacji jest bardzo wysokie za wyjątkiem dwóch obszarów niepewności, które zostały przyporządkowane do jednego neuronu każdy. Do czterech neuronów nie przyporządkowano żadnego płomienia. Rys. 6.6. przedstawia

graficzną reprezentację sieci z zaznaczeniem numerów płomieni przyporządkowanych do neuronów, zero oznacza brak przyporządkowania.



Rys. 6.6. Graficzna reprezentacja sieci z zaznaczeniem numerów płomieni przyporządkowanych do neuronów.

Sieci tego typu mogą służyć do klasyfikacji płomieni prawidłowy – nieprawidłowy. Odpowiednio zaprojektowane i nauczone sieci mogą również służyć do rozpoznawanie symptomów początków nieprawidłowego spalania lub awarii.

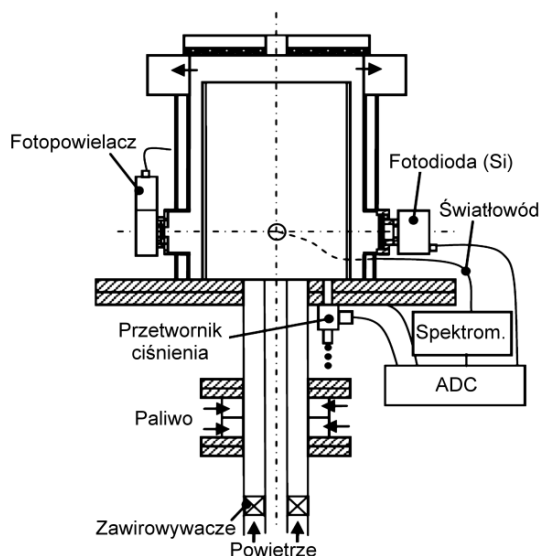
6.1.3. Stechiometria spalania

Stosunek powietrza do paliwa jest kluczowym parametrem procesu spalania. Od niego zależy efektywność spalania, wielkość emisji substancji szkodliwych czy stabilność płomienia. W przypadku turbin gazowych, w celu obniżenia emisji NO_x, stosuje się technikę spalania ubogiej mieszanki. Istnieje pewna optymalna wartość współczynnika ekwiwalencji, która minimalizuje emisję tlenku węgla przy niskiej wartości emisji tlenków azotu. Płomień uboższy od wartości optymalnej emituje dużo CO i jest bliższy ryzyka utraty stabilności lub zdmuchnięcia. Stąd też dla turbiny pracującej w trybie niskoemisyjnym tak ważne jest stałe monitorowanie i diagnostyka prawidłowej stechiometrii płomienia. Zagadnienie dodatkowo komplikuje się przy uwzględnieniu współczesnych tendencji legislacji środowiskowej. Jak już wspomniano w rozdziale 3.5. na skutek polityki Unii Europejskiej wzrastał będzie udział paliw alternatywnych, głównie z surowców odnawialnych. W przypadku paliw gazowych stosowane jest zgazowanie biomasy lub metanowa fermentacja odpadów, przykładowy skład tak uzyskanego gazu pokazuje tabela 6.2. Gazy powstałe w wyniku zastosowania tych technologii spalane są bezpośrednio lub w mieszaninie z gazem ziemnym. Efektywne i czyste spalanie takich paliw napotyka na szereg problemów technicznych. Jednym z nich jest opracowanie nowych konstrukcji palników dla paliw, których właściwości fizykochemiczne mogą istotnie odbiegać od właściwości gazu ziemnego. Generalnie paliwa alternatywne charakteryzują się niską lub bardzo niską kalorycznością oraz zmiennością właściwości (pomiędzy wsadami lub w czasie procesu ciągłego). Zmienność parametrów tego typu paliw może doprowadzić do nieprawidłowej pracy systemu, zwiększonej emisji zanieczyszczeń, zmniejszonej sprawności lub problemów ze stabilnością płomienia, szczególnie przy spalaniu mieszanki

ubogiej. Dlatego też, nawet jeżeli turbina została zaprojektowana do pewnego rodzaju paliwa alternatywnego, konieczny jest stały nadzór i optymalizacja aby zapewnić niezawodność systemu. Dodatkową trudność sprawia fakt, że konwencjonalne przepływomierze w takich warunkach eksploatacji turbin są trudne do zastosowania (przede wszystkim w przypadku pomiaru przepływu powietrza) [54]. Z powyższych powodów dużo pracy poświęca się na opracowanie metody diagnostyki prawidłowości stechiometrii spalania. Ze względu na ich korzystne cechy, szczególne dużo uwagi poświęca się metodom optycznym.

Tabela 6.2. Skład gazów uzyskiwanych z różnych rodzajów biomasy

składnik mieszaniny	technologia		
	fermentacja	gaz wysypiskowy	zgazowanie
CH ₄	60%	60%	3%
H ₂	30%		16%
CO	-		22%
CO ₂	+	30%	14%
N ₂		6%	44%
H ₂ O	do 10%	3%	



Rys. 6.7. Schemat stanowiska pomiarowego [215]

W celu znalezienia odpowiedniej metody uzyskiwania informacji o przebiegu procesu spalania tego rodzaju gazów badane było spalanie kinetyczne ubogiej mieszanki gazu naturalnego z dodatkami, które reprezentowały wybrane gazy syntetyczne: gaz ziemny z wodorem oraz gaz ziemny z dwutlenkiem węgla.

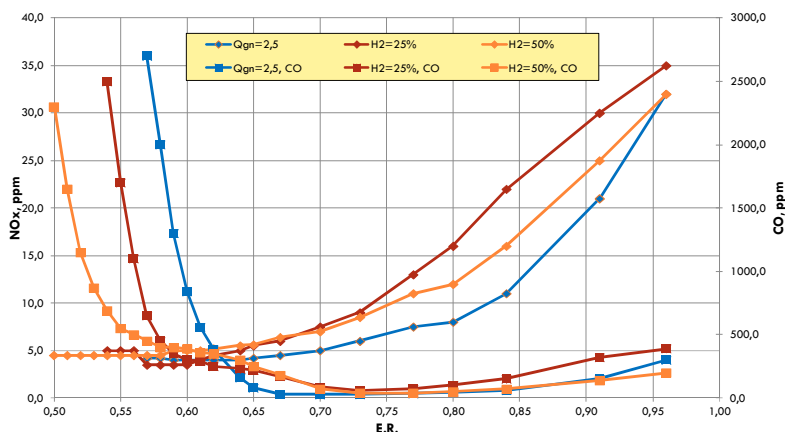
Badania wykonano na stanowisku znajdującym się na Uniwersytecie w Saragossie. Jest to palnik atmosferyczny z cylindryczną pionową komorą spalania wykonaną ze szkła kwarcowego ($L=250\text{mm}$, $\varnothing=120\text{mm}$) zapewniającą optyczny dostęp do płomienia (rys. 6.7). Mieszanaka paliwowo-powietrzna formowana jest przez zawirowywacz pierścieniowy i podawana do komory przez 12 otworów o małych wymiarach tak, aby zapewnić brak sprzężenia akustycznego pomiędzy komorą spalania i systemem mieszania. Całość osłonięta jest stalową obudową z otworami do mocowania urządzeń optycznych, chłodzoną płaszczem wodnym. Stanowisko wyposażone jest w cztery tory gazowe (np. powietrze, metan, wodór, ditlenek węgla) z termicznym pomiarem strumienia i regulatorami przepływu.

Do detekcji promieniowania emitowanego przez płomień wykorzystuje się

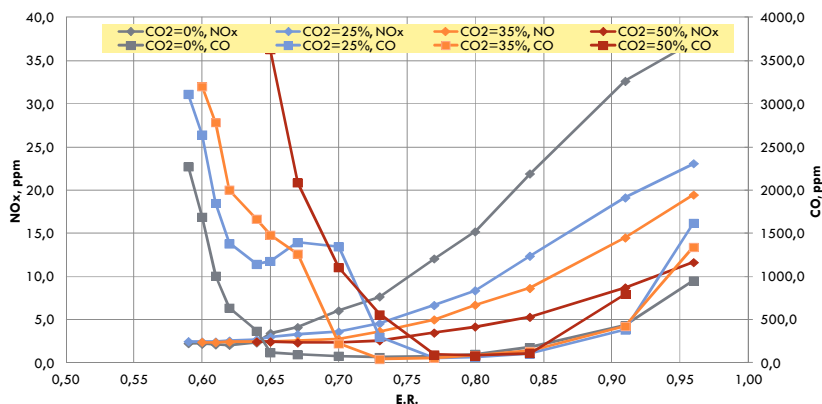
- fotopowielacze z filtrami interferencyjnymi mierzące chemiluminescencję głównych rodników (OH^* , CH^* , C_2),
- fotodiode krzemową (190–1100nm) mierzącą głównie widmo CO_2^* ,
- światłowodowy spektrometr Ocean Optics HR2000, z siatką 300 linii/mm i szczeliną $50\mu\text{m}$, co daje rozdzielczość widmową 1nm, maksimum czułości przy 400nm podłączony przez światłowód kwarcowy, presolaryzowany, z rdzeniem o średnicy $600\mu\text{m}$ i aperturze numerycznej $\text{NA}=0,22$; rejestracja z czasem ekspozycji 1000ms bez uśredniania i wygładzania.

Na wylocie rury kwarcowej mierzony jest skład gazów spalinowych (O_2 , CO , CO_2 i NO_x) [215].

Pomiary wykonywane były przy stałym przepływie paliwa tak, aby obliczeniowa moc cieplna palnika była utrzymywana na stałym poziomie. Regulowana była ilość dopływającego powietrza. Pomiaru dokonywano w warunkach quasistacjonarnych po ustaleniu się wskazań analizatorów gazów.



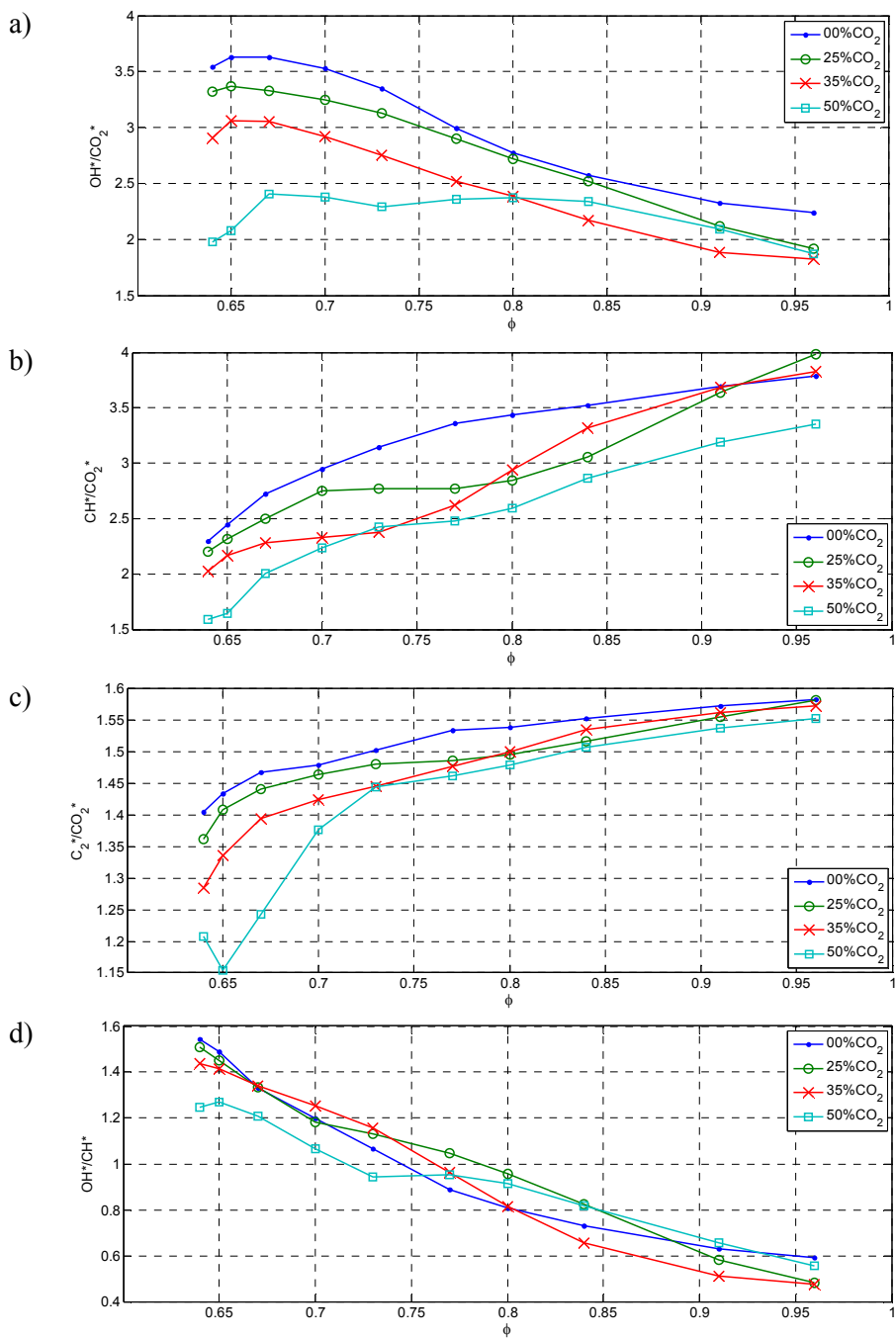
Rys. 6.8. Emisja NO_x i CO przy spalaniu mieszaniny gazu naturalnego i wodoru



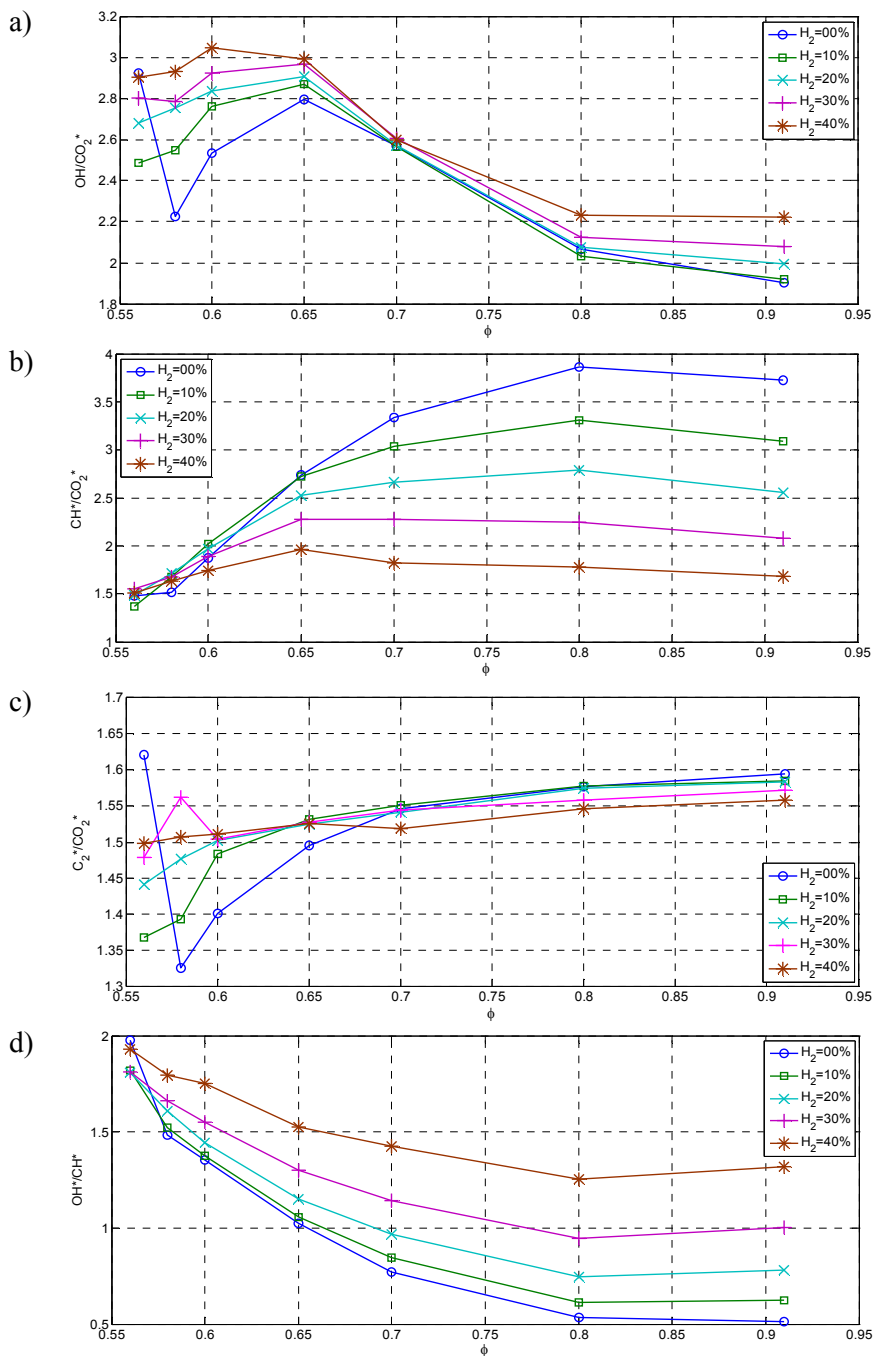
Rys. 6.9. Emisja NOx i CO przy spalaniu mieszaniny gazu naturalnego i ditlenku węgla

Na rys. 6.8 i rys. 6.9 pokazano wykresy emisji NOx i CO przy różnych współczynnikach ekwiwalencji (E.R.) dla powyższych mieszanin. Jak widać, ograniczenie ze względu na emisję CO jest w obydwu przypadkach przesunięte. Większy udział wodoru pozwala na uboższą mieszaninę, jednakże poziom emisji NOx jest nieco podniesiony. Zwiększający się udział CO₂ daje wyższą emisję CO – mieszanka powinna być bogatsza, jednakże równoczesny spadek emisji NOx do pewnego stopnia kompensuje wymagany wzrost nadmiaru powietrza. W obydwu przypadkach przebieg emisji w obszarze mieszanki ubogiej jakościowo nie zmienia się.

Zmienia się również stabilność spalania. Wodór generalnie poprawia stabilność. Przy zawartości 50% H₂ w paliwie udało się uzyskać stabilne spalanie nawet przy współczynniku ekwiwalencji równym około 0,5, dla czystego metanu dla tego współczynnika płomień ulegał zdmuchnięciu. Z drugiej strony dla bogatych mieszanek ($\phi > 1$) duży udział wodoru powoduje, że szybkość reakcji jest tak duża, że płomień cofa się do wnętrza palnika (ang. *flash back*), co grozi jego zniszczeniem, a nawet wybuchem instalacji zasilania gazem. Działanie ditlenku węgla jest odwrotne. Jest to gaz inertny i w obszarze mieszanek ubogich bardzo trudno jest podtrzymać spalanie, nawet kiedy dla czystego metanu przebiegało ono prawidłowo. Wiąże się to z intensywniejszym schładzaniem płomienia. Zwiększona ilość ditlenku węgla w spalanej mieszance może nastąpić na skutek nieprawidłowości w procesach produkcji metanu lub gazu syntezowego. Przy wytwarzaniu metanu w bioreaktorach CO₂ pojawia się na skutek wystąpienia fermentacji alkoholowej. W procesie zgazowania zwiększona ilość CO₂ ma miejsce, gdy wsad spala się zamiast ulegać procesowi pirolizy (najczęściej na skutek zbyt wysokiej ilości powietrza).



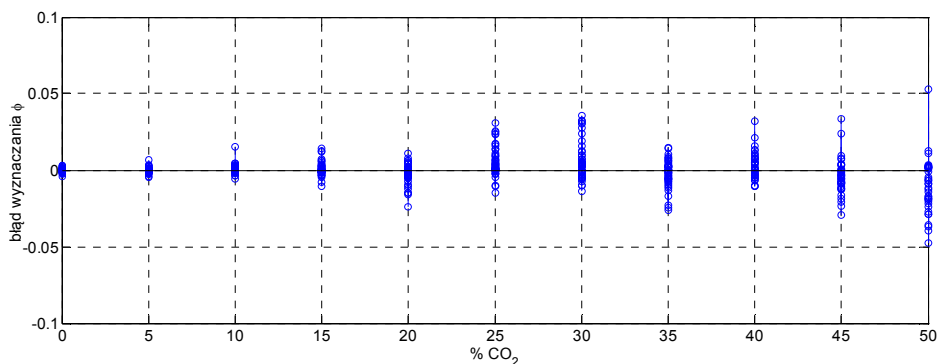
Rys. 6.10. Iloraz intensywności emisji a) OH^*/CO_2^* , b) CH^*/CO_2^* , c) C_2^*/CO_2^* , d) OH^*/CH^* w funkcji współczynnika ekwiwalencji dla różnych udziałów metan/ CO_2 w paliwie



Rys. 6.11. Iloraz intensywności emisji a) OH^*/CO_2^* , b) CH^*/CO_2^* , c) C_2^*/CO_2^* , d) OH^*/CH^* w funkcji współczynnika ekwiwalencji dla różnych udziałów metan/ H_2 w paliwie

Zmieniają się również stosunki intensywności chemiluminescencji poszczególnych rodników. Wyniki rejestracji intensywności emisji rodników OH^* , CH^* , C_2^* i CO_2^* w funkcji współczynnika ekwiwalencji dla różnych udziałów CO_2 i H_2 w paliwie pokazano odpowiednio na rys. 6.10 i rys. 6.11. Badania te pokazały, że zastosowanie metody pomiaru ilorazu intensywności emisji rodników [216] nie daje jednoznacznych rezultatów dla gazowych paliw alternatywnych. Istnieje więc problem uzyskania prawidłowych sygnałów diagnostycznych do późniejszej oceny prawidłowości spalania.

Zaproponowana została autorska metoda, która oparta jest nie tylko na informacji o uśrednionej w czasie intensywności, lecz również o cechach jej dynamiki [143, 215]. Ponieważ celem badań było otrzymanie sygnału, który mógłby służyć zarówno do diagnostyki, jak i sterowania, wykorzystano rozmyte sieci neuronowe. Na podstawie poprzednich doświadczeń (np. [316, 317]), podobnie jak w przypadku opisywanym w rozdziale 6.1.2, jako wejścia sieci wybrano wartość średnią oraz wariancję sygnału z obydwu czujników (fotopowielacza i fotodiody) w okresie jednej sekundy. Na rys. 6.12 pokazano zależność błędu wyznaczania parametrów spalania od zawartości CO_2 w spalanej mieszaninie. Błąd ten jest najmniejszy dla czystego metanu i rośnie wraz z rosnącą zawartością dwutlenku węgla, przy czym nawet dla najwyższej zawartości CO_2 w spalanej mieszaninie (50%) błędy nie przekraczają 10% wartości współczynnika ekwiwalencji. Podobne rezultaty otrzymano dla mieszanek z wodorem.



Rys. 6.12. Zależność błędu wyznaczania współczynnika ekwiwalencji od zawartości CO_2 w spalanej mieszaninie [316]

Tak otrzymany sygnał diagnostyczny może służyć do detekcji nieprawidłowości spalania, np. w najprostszym przypadku za pomocą kontroli granic alarmowych. Możliwe jest również zastosowanie metody opisanej w rozdziale 6.1.2.

6.2. Diagnostyka płomienia pyłowego przy spalaniu węgla i współspalaniu z biomasa

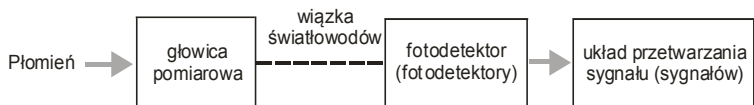
W przypadku płomienia pyłowego dominująca składowa emisji pochodzi od promieniowania cząstek stałych (przede wszystkim sadzy) o charakterze ciała szarego. Jest ona przynajmniej dwa rzędy wielkości większa niż pozostałe [144, 320]. Nie jest więc możliwe użycie metod diagnostyki opartych na chemiluminescencji, a użycie promieniowania gorących gazów jest mocno ograniczone. Z tych powodów zazwyczaj wykorzystywane jest całkowite promieniowanie akceptowane przez detektor – najczęściej fotodiodę krzemową. Do określenia parametrów spalania można wykorzystać fakt, że w palnikach przemysłowych prędkości wypływu paliwa oraz powietrza są na tyle duże, że spalanie w kotłach energetycznych odbywa się w płomieniach turbulentnych. Stwarza to dodatkowe trudności pomiarowe, lecz jednocześnie daje pośrednią informację o stanie pracy palnika. Turbulencje płomienia uzewnętrzniają się, między innymi, jako migotanie płomienia. Ponieważ proces spalania wywiera wpływ na turbulentny ruch składników i produktów spalania [318, 319], to wywiera również wpływ na parametry migotania płomienia, np. średnią jasność, amplitudę zmian jasności, jak również ich widmo częstotliwościowe.

W rozdziale tym zostaną opisane metody diagnostyczne z wykorzystaniem przede wszystkim opracowanego w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej (obecnie Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych), wielokanałowego, światłowodowego układu monitorowania płomienia [40, 31, 41]. Układ ten pozwala na obserwację płomienia w jego wybranych strefach [323, 324]. Najpierw zostaną opisane metody diagnostyczne polegające na rozpoznawaniu stanu obiektu (palnika pyłowego) według schematu pokazanego na rys. 2.2 i rys. 2.4. Jako przykład zostanie pokazana diagnostyka polegająca na określeniu trzech stanów: prawidłowy nadmiar powietrza, zbyt wysoki nadmiar powietrza i zbyt niski nadmiar powietrza. Następnie zostanie pokazane zastosowanie diagnostyki powyższych stanów najpierw przy spalaniu pyłu węglowego a następnie przy spalaniu mieszaniny składającej się z 90% pyłu węglowego i 10% biomasy. Jako klasyfikator zostanie użyta rozmyta sieć neuronowa. Na zakończenie zostaną pokazane metody opierające się na wykorzystaniu prostych zależności geometrycznych.

6.2.1. Światłowodowy układ monitorowania płomienia

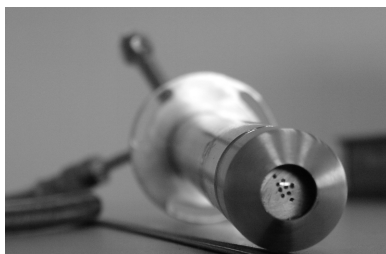
W skład układu monitorowania płomienia, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku, wchodzi następujące elementy:

- głowica pomiarowa (umieszczona wewnątrz komory spalania),
- wiązka światłowodów,
- fotodetektory,
- układ przetwarzania sygnałów.



Rys. 6.13. Schemat blokowy układu monitorowania płomienia [322]

Najważniejszym elementem układu, od którego w zasadniczym stopniu zależy jego poprawna praca, jest światłowodowa głowica pomiarowa transmitująca promieniowanie emitowane przez płomień do detektorów, usytuowanych na zewnątrz komory spalania (rys. 6.13). Czoło głowicy umieszczone jest wewnątrz komory paleniskowej, w pobliżu pracującego palnika pyłowego. Narażone jest ono na temperaturę powyżej 400°C, wysokie zapylenie i wibracje. Do głowicy doprowadzone jest sprężone powietrze, które ją chłodzi i zapobiega zabrudzeniu elementów optycznych. Przy odpowiednio dobranym kształcie czoła głowicy pozwala to na długotrwałą pracę (rzędu 4÷12 tygodni) bez konieczności jej mechanicznego czyszczenia. Dzięki odpowiedniemu rozłożeniu światłowodów, możliwa jest selektywna transmisja promieniowania z określonych obszarów płomienia. Sprzężenie optyczne pomiędzy głowicą pomiarową oraz płomieniem, uwzględnia objętościowy charakter źródła promieniowania, jakim jest płomień [323].



Rys. 6.14. Światłowodowa głowica pomiarowa [321]

Wiązka światłowodów umożliwia umieszczenie fotodetektorów i ich wzmacniaczy 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 wyższych temperaturach, światłowody HCS [323, 326]. Drugim powodem zastosowania światłowodów PCS lub HCS jest silna, nieodwracalna degradacja światłowodów domieszkowanych, (w których odpowiednie kształtowanie profilu współczynnika załamania osiąga się przez domieszkowanie, np. germanem) pod wpływem promieniowania UV [327, 328].

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 [323].

W układzie przetwarzania sygnał z fotodetektora zostaje poddany wzmocnieniu. Sygnały wyjściowe, odpowiadające poszczególnym kanałom optycznym wyprowadzane są w standardzie 4÷20mA [338].

6.2.2. Badania wstępne – dostosowanie sondy do palnika i kotła

W praktyce przemysłowej istotne jest, aby ocenę stanu procesu spalania można było przeprowadzić w czasie rzeczywistym, przy zazwyczaj bardzo ograniczonych możliwościach obliczeniowych przemysłowych systemów pomiarowo-sterujących. Ocena taka powinna więc być przeprowadzona za pomocą jak najmniejszej liczby sygnałów diagnostycznych. Struktura płomienia nie jest jednorodna, należy więc wyznaczyć jego obszar, który jest najbardziej wrażliwy na zmiany punktu pracy palnika. Każdy typ kotła to konstrukcja indywidualna. Kotły i palniki różnią się od siebie, dlatego układ optyczny musi być dostosowany indywidualnie. Część parametrów systemu optycznego można wyznaczyć na podstawie konstrukcji kotła, jednakże do optymalizacji układu optycznego potrzebne są badania na działającym obiekcie. W tym celu, analizowano sygnały optyczne pochodzące z wydzielonych stref płomienia. Wskazanie strefy płomienia najbardziej wrażliwej na zmiany parametrów wejściowych palnika, dokonane zostało na podstawie analizy składowych głównych (ang. *Principal Component Analysis* – PCA), przeprowadzonej dla wspomnianych sygnałów [260, 344, 345]. Poniżej opisana jest przykładowa procedura dla jednej z największych jednostek zbudowanych w Polsce – kotła AP-1650.

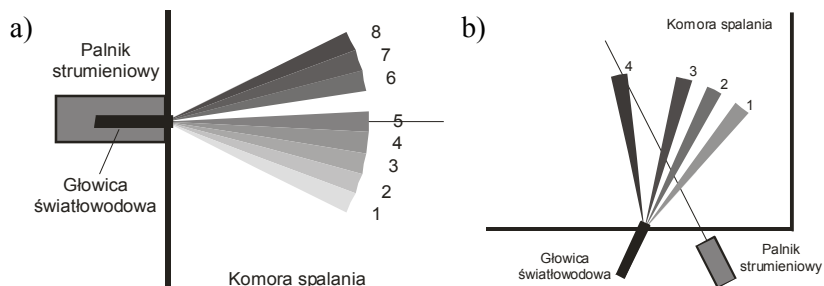
Badania obejmują różne ustawienia głowicy względem płomienia, podczas pracy z wymuszonymi zmianami podstawowych parametrów pracy palnika, takich jak:

- zmiany wydatku powietrza wtórnego,
- zmiany pochylenia zespołu palnikowego,
- zmianę konfiguracji młynów węglowych,
- załączanie palników mazutowych.

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.

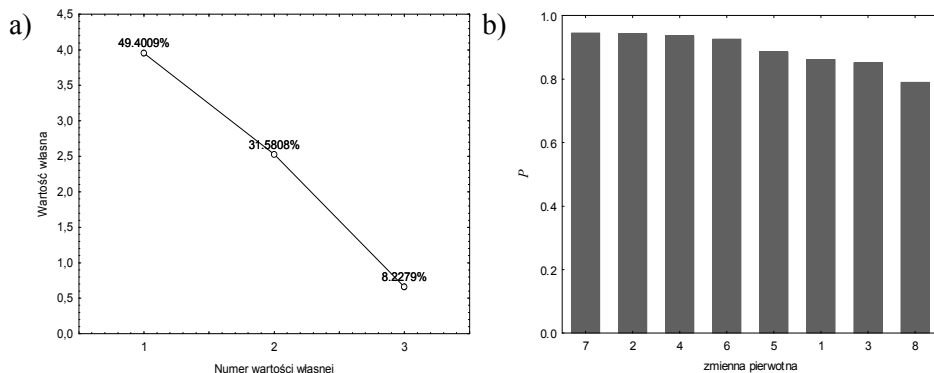
Dwie identyczne głowice pomiarowe zostały zainstalowane w pobliżu pracujących palników strumieniowych. Pierwsza z nich została umieszczona

w taki sposób, że obserwowane obszary płomienia, zawarte w kątach akceptacji poszczególnych światłowodów rozmieszczone były pionowo, jak pokazano schematycznie na rys. 6.15a. Analiza składowych głównych została przeprowadzona dla 8 sygnałów. Za pomocą drugiej sondy, badano 4 przypadki przy poziomym rozmieszczeniu obszarów obserwacji włókien światłowodowych względem komory spalania (rys. 6.15b).



Rys. 6.15. Rozmieszczenie badanych obszarów płomienia w zależności od usytuowania głowicy pomiarowej względem komory spalania: a) pionowe (widok z boku), b) poziome (widok z góry) [344]

Według kryterium Keisera w przypadku rozmieszczenia pionowego, liczba wymiarów może zostać zredukowana z 8 do 2 składowych głównych. Jak widać na wykresie osypiskowym (rys. 6.16a), procent wariancji wyjaśnionej dla pierwszej składowej głównej wyniósł 49,4%, a dla drugiej i trzeciej odpowiednio 31,58% i 8,23%.



Rys. 6.16. 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 siłą zmiennych P [344]

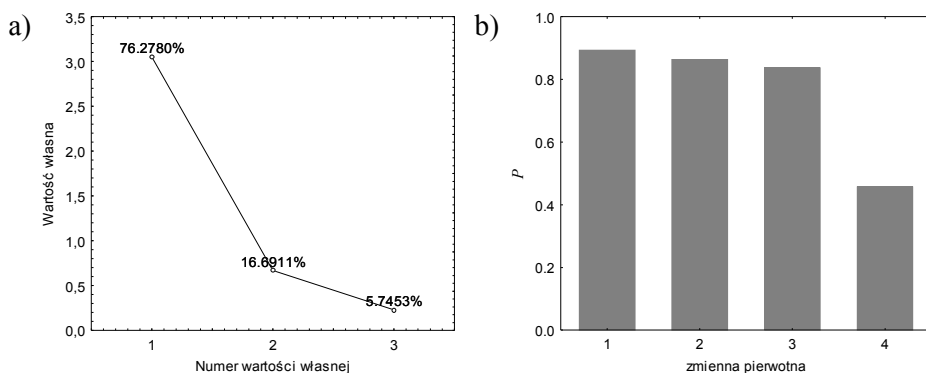
Wartości wskaźnika P obliczone dla poszczególnych zmiennych pierwotnych wskazują na ich udział w tworzonym modelu PCA. Na tej podstawie możliwe jest wskazanie obszarów płomienia, które są najbardziej wrażliwe na zmiany punktu pracy palnika. Z porównania przedstawionego na rys. 6.16b wynika, że

strefą najbardziej wrażliwą jest strefa oznaczona numerem 7 a najmniej – strefa numer 8 (oznaczenia wg rys. 6.15a).

Przy rozpatrywaniu położeniu sondy, trudno jest wyróżnić miejsce płomienia, o szczególnym znaczeniu ze względu na zmienność 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 utworzonym modelu PCA.

Podobną analizę przeprowadzono dla ustawienia sondy, w którym strefy płomienia były rozmieszczone poziomo (rys. 6.15b). Wykres osypiska z zaznaczonymi procentami wariancji wyjaśnionej dla trzech największych składowych głównych pokazany jest na rys. 6.17a. 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.

Z analizy mocy (parametr P) rozpatrywanych zmiennych pierwotnych (rys. 6.17b) wynika, że najbardziej wrażliwą zmienną pierwotną, jest zmienna 1. W rozpatrywanym położeniu sondy jest to strefa położona najbliżej palnika. Strefa położona najdalej (strefa 4), nie wnosi istotnej informacji, na co wskazuje odbiegająca od pozostałych, niska wartość P dla tej zmiennej.



Rys. 6.17. Wyniki analizy PCA dla danych uzyskanych przy poziomym rozmieszczeniu obszarów płomienia [344]

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 również podczas testów spalania pyłu węglowego na stanowisku laboratoryjnym [344].

6.2.3. Stanowisko laboratoryjne

Większość badań dotyczących spalania paliw stałych, przedstawionych w niniejszej pozycji przeprowadzono na stanowisku zlokalizowanym

w Instytucie Energetyki w Warszawie. Jest to komora spalania z pojedynczym pyłowym palnikiem wirowym wykonanym w skali 1:10 w stosunku do niskoemisyjnego palnika przemysłowego z rozdziałem powietrza wtórnego. Obiekt ten został wybrany ze względu na możliwość wykonywania eksperymentów z pojedynczym palnikiem, oraz jego dobre opomiarowanie.

Stanowisko badawcze umożliwia zadawanie:

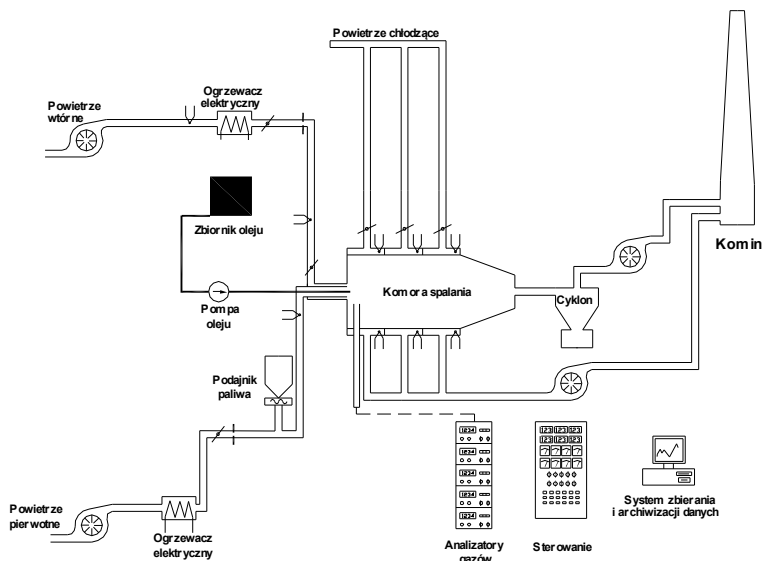
- prędkości przepływu strumieni powietrza,
- obrotów podajnika węgla.

Pozwala ono na pomiar następujących wielkości:

- prędkości przepływu z wentylatora powietrza pierwotnego („młynowego”),
- prędkości przepływu z wentylatora powietrza wtórnego,
- prędkości przepływu z wentylatora powietrza „trzeciego”,
- ilości pyłu węglowego w zasobniku (waga),
- temperatury średniej w komorze,
- obrotów podajnika węgla,
- składu gazów w odległości 1m od czoła palnika: O_2 , CO i NO ,
- składu gazów na wylocie komory paleniskowej: O_2 , CO , NO i SO_2 (analiza dokonywana jest przez dwa niezależne urządzenia),
- temperatury w punktach charakterystycznych.

Na podstawie tych wielkości wyliczane są:

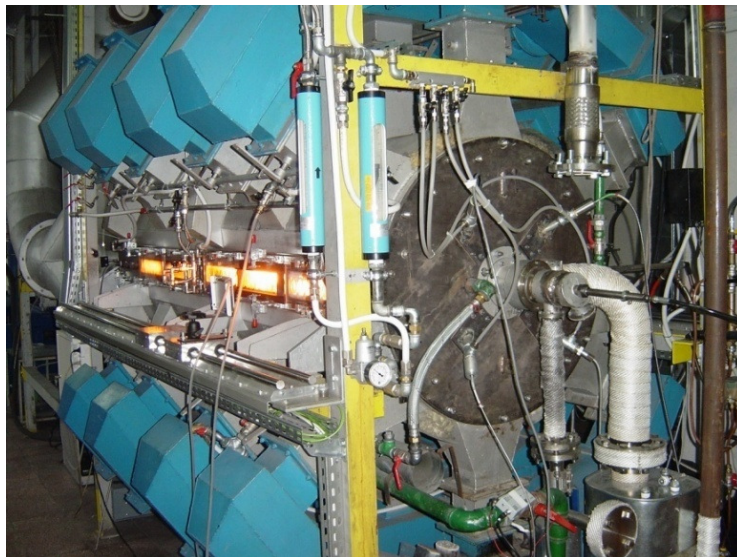
- wydatki powietrza w warunkach normalnych dla każdego ze strumieni,
- wydatek węgla.



Rys. 6.18. Schemat stanowiska badawczego

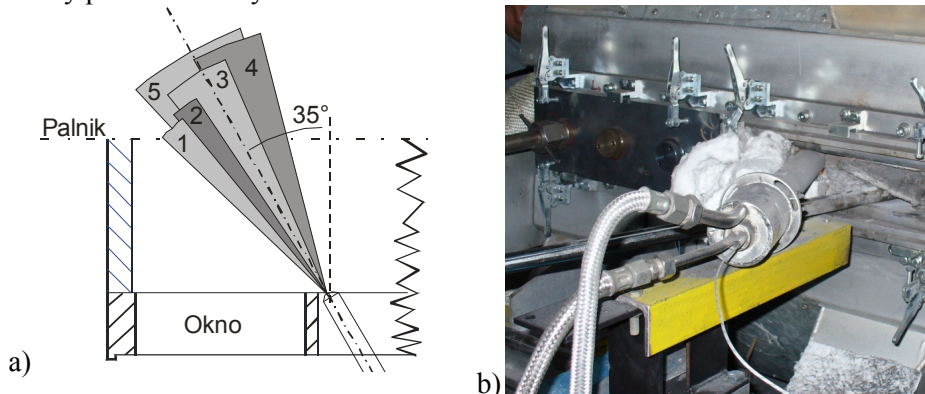
Wielkości mierzone i część wyliczonych – istotnych z punktu widzenia prowadzenia procesu spalania – są obrazowane oraz zapisywane w systemie zbierania danych. Okres próbkowania wynosi systemu 1s.

Schemat badanego obiektu pokazano na rys. 6.18, a na rys. 6.19 pokazano widok komory.



Rys. 6.19. Widok stanowiska badawczego

Komora spalania wyposażona jest w sondę światłowodową. Szkic komory z zaznaczonymi obszarami widzenia światłowodów oraz widok umieszczenia sondy pokazano na rys. 6.20.



Rys. 6.20. Obszary obserwacji przez światłowody (a) i widok sondy zainstalowanej na stanowisku(b)

6.2.4. Metodyka pomiarów

Testy przeprowadzono na stanowisku opisanym w poprzednim rozdziale. Uruchomienie stanowiska przebiega podobnie jak uruchomienie kotła energetycznego. Najpierw stanowisko wstępnie wygrzewane jest gorącym powietrzem. Ze względu na temperaturę zbyt niską do zainicjowania wydzielania części lotnych z węgla, na początku testu włączany jest tylko pomocniczy palnik olejowy, zapalany od palnika gazowego. W chwili, gdy temperatura wewnątrz komory spalania osiąga poziom powyżej temperatury samozapłonu węgla (około 200°C) włączany jest ślimakowy podajnik węgla, którego prędkość obrotowa początkowo jest na poziomie $1,5s^{-1}$ (90obr/min). Dostarczany do palnika pył węglowy ulega zapłonowi od pracującego palnika olejowego. Po wzroście temperatury w komorze spalania do wartości wystarczającej do stabilnego zapłonu pyłu węglowego, wyłączany jest palnik olejowy – od tego momentu pracuje tylko palnik pyłowy. Obroty podajnika są następnie zwiększane aż do osiągnięcia wymaganych przez warunki eksperymentu. Wydatek paliwa stałego nie jest proporcjonalny do prędkości obrotowej podajnika w związku z tym jest obliczany na podstawie ubytku masy paliwa z zasobnika. Procedura wygaszenia stanowiska polega na wypaleniu reszty paliwa znajdującej się w zasobniku przy obecności płomienia olejowego. Po całkowitym usunięciu paliwa stałego z zasobnika i pyłoprzewodów wyłącza się palnik olejowy. Do momentu obniżenia się temperatury w komorze poniżej wartości umożliwiającej całkowite wyłączenie aparatury komora jest wentylowana za pomocą powietrza wtórnego.

Badane były dwa rodzaje paliwa: czysty węgiel i mieszanina węgla z dodatkiem biomasy. Mieszanina została przygotowana przed wykonaniem testów spalania. Badania wykonane zostały dla 10%, 20% i 30% zawartości biomasy w mieszaninie dla dwóch rodzajów biomasy: rozdrobnionej słomy i rozdrobnionych trocin drzewnych. Testy obejmowały spalanie obydwu rodzajów paliwa przy trzech poziomach obciążenia termicznego komory dla trzech przypadków nadmiaru powietrza. Nadmiar powietrza był dobrany tak, aby jeden z przypadków odzwierciedlał normalne warunki spalania w nisko-emisyjnym palniku wirowym ($\lambda \approx 0,77$), a pozostałe dwa wartości wyższą i niższą. Tabela 6.3 zawiera zestawienie wartości średnich głównych parametrów testów. Rejestracja w każdym teście wykonywana była po ustaleniu się równowagi termicznej w komorze i trwała 300s. W trakcie trwania rejestracji warunki spalania (wydatki paliwa i powietrza, temperatura itp.) utrzymywane są na stałym poziomie. Taki sposób prowadzenia pomiarów ma za zadanie wyeliminowanie wpływu opóźnienia transportowego analizatorów gazów. Zakłada się przy tym, że podczas pomiaru warunki są stacjonarne a wartości emisji ustabilizowane. Jest to istotne ze względu na wpływ podciśnienia w komorze spalania na wielkość opóźnienia i trudności uzyskania tej samej wartości podciśnienia w przypadku wszystkich pomiarów. Z drugiej strony taka

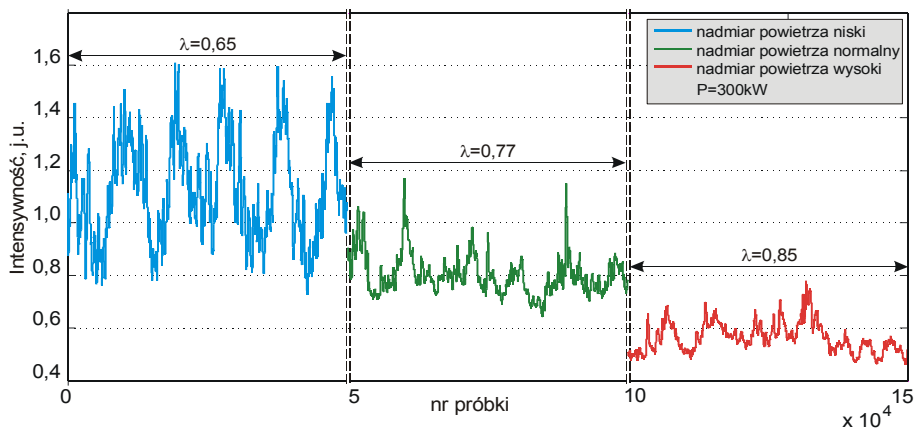
strategia uniemożliwia trenowanie dynamicznych sieci neuronowych ze względu na nieciągłość danych. Częstotliwość próbkowania wynosiła 8192Hz dla każdego z kanałów.

Tabela 6.3. Główne parametry testów (wartości średnie)

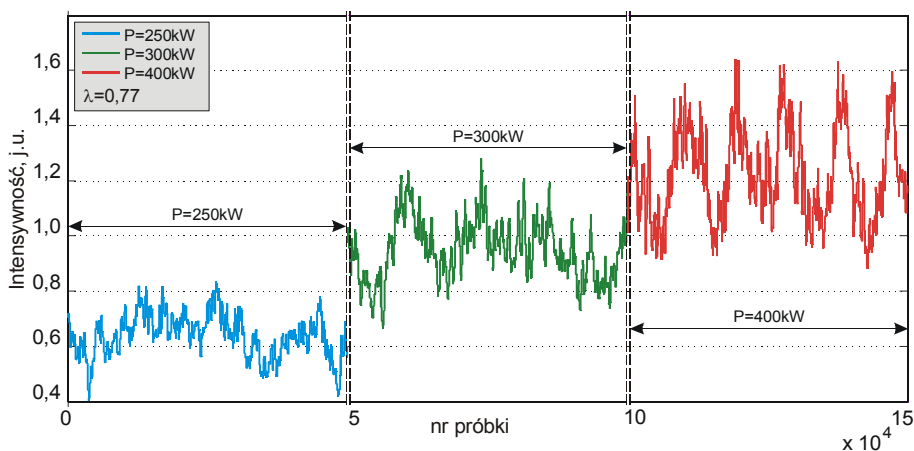
Nr testu	Paliwo	Przepływ powietrza wtórnego	Wydatek paliwa	Nadmiar powietrza	Moc
1	węgiel	151,16	54,08	~0,65	400
2		185,95	54,61	~0,77	400
3		210,51	55,14	~0,85	400
4		93,03	41,55	~0,65	300
5		121,35	41,61	~0,77	300
6		148,51	41,98	~0,85	300
7		72,81	33,78	~0,65	250
8		96,35	33,93	~0,77	250
9		126,71	34,85	~0,85	250
10	węgiel + 10% biomasy	128,75	56,76	~0,65	400
11		213,74	55,90	~0,77	400
12		129,06	53,43	~0,85	400
13		74,66	41,88	~0,65	300
14		104,60	42,75	~0,77	300
15		152,22	44,17	~0,85	300
16		64,89	37,02	~0,65	250
17		78,56	35,00	~0,77	250
18		109,58	34,21	~0,85	250

6.2.5. Wyniki pomiarów

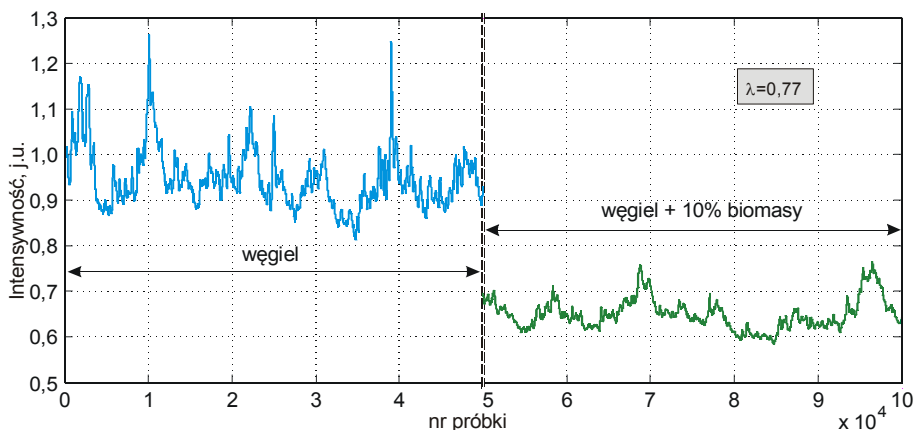
Podczas zmiany parametrów spalania widoczna jest zależność chwilowej intensywności od stechiometrii spalania (rys. 6.21), obciążenia termicznego (mocy) (rys. 6.22), czy rodzaju paliwa (rys. 6.23). Surowe przebiegi są bardzo trudne do interpretacji. Do oceny prawidłowości procesu spalania (diagnostyki) konieczne jest dalsze przetworzenie sygnałów tak, aby uzyskać informację możliwą do interpretacji przez operatora lub do wykorzystania w systemie sterowania (zarządzania) kotłem.



Rys. 6.21. Przebiegi czasowe intensywności dla różnych współczynników nadmiaru powietrza.



Rys. 6.22. Przebiegi czasowe intensywności dla różnych mocy



Rys. 6.23. Przebiegi czasowe intensywności dla węgla i mieszanki węgla z biomasą

6.2.6. Przetwarzanie wstępne

Przetwarzanie wstępne ma na celu wyodrębnienie cech sygnału, które są istotne z punktu widzenia diagnostyki – sygnałów diagnostycznych [53]. W najprostszym przypadku jest to wartość średnia sygnału w danym przedziale czasowym:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (6.1)$$

gdzie x_i oznacza wartość sygnału w chwili i , $i \in \langle 1, N \rangle$, a N jest ilością próbek w danym przedziale czasowym. Takie podejście stosowane jest w prostych detektorach obecności płomienia. Jak wspomniano, ono poważną wadę polegającą na zakłócaniu jej pracy przez sąsiednie palniki oraz rozgrzane elementy i ściany komory spalania. Bardziej zaawansowane podejście wykorzystuje składową zmienną sygnału z fotodetektora uzyskaną najczęściej poprzez analogową, bądź cyfrową filtrację górnoprzepustową.

Stosowane są również parametry statystyczne – wariancja (6.2), odchylenie standardowe, współczynnik skośności (6.3) czy kurtoza (6.4) [49, 50, 215, 322], tzn.:

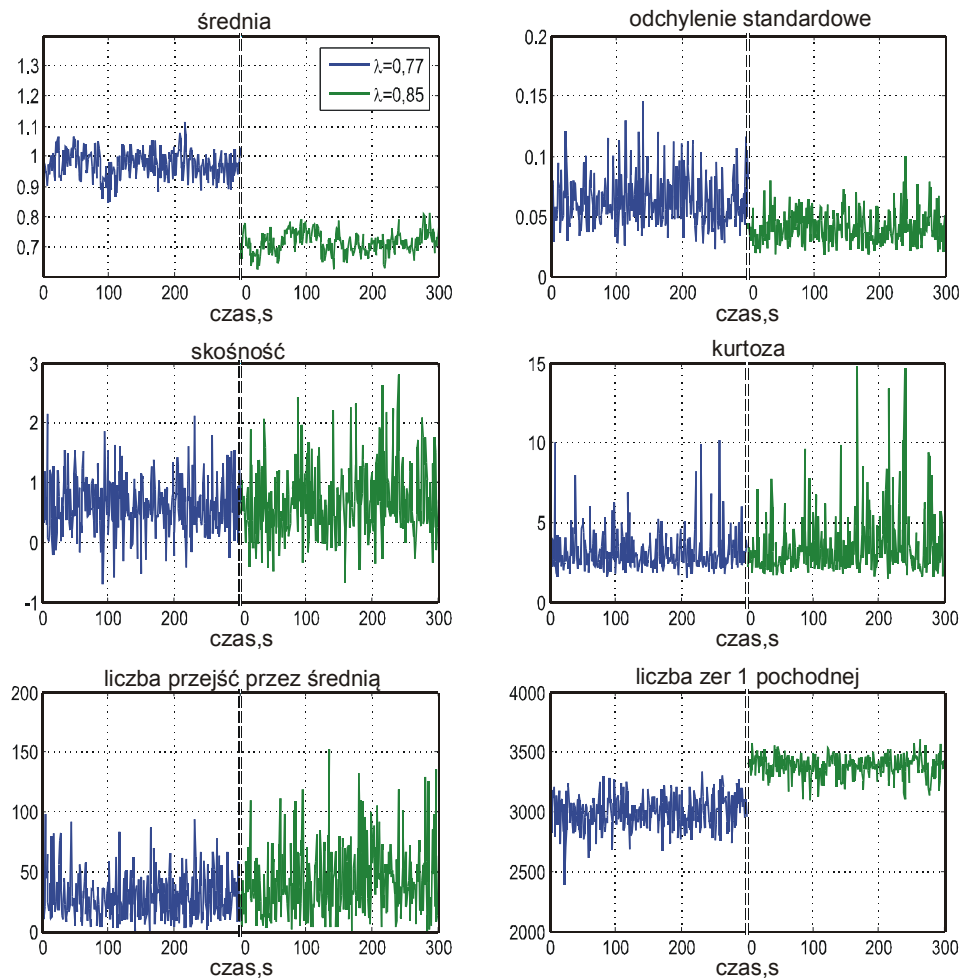
$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2, \quad (6.2)$$

$$Skew = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^3}{s^3}, \quad (6.3)$$

$$Kurt = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^4}{s^4} - 3. \quad (6.4)$$

Powyższe parametry wyznaczone są w oknach czasowych. Ze względu na najczęściej stosowaną częstotliwość próbkowania w przemysłowych systemach pomiarowo-sterujących wynoszącą 1Hz, długość okna najczęściej wynosi 1s. Wszystkie powyższe parametry są zależne od amplitudy i w przypadku zabrudzenia układu optycznego będą niezgodne z pierwotnym skalowaniem. Wady tej nie będą miały parametry będące pewną miarą częstotliwościową np. liczba przejść przez średnią w danym przedziale czasowym lub liczba zer pierwszej pochodnej sygnału. Używane są również techniki bardziej złożone, np. wykorzystanie współczynników transformaty Fouriera lub falkowej [32].

Dla wszystkich 18 szeregów zarejestrowanych podczas spalania w oknach 1s zostały wyznaczone następujące cechy: wartość średnia, odchylenie standardowe, skośność, kurtoza, liczba przejść przez wartość średnią oraz liczba miejsc zerowych pochodnej. Cechy te wyznaczono dla wszystkich 5 kanałów sondy optycznej. Daje to łącznie wektor 30 cech dla każdego zarejestrowanego szeregu. Na rys. 6.24 pokazano przykładowe przebiegi cech dla pomiaru nr 2 (moc 400kW, $\lambda \approx 0,77$) i kanału nr 5.

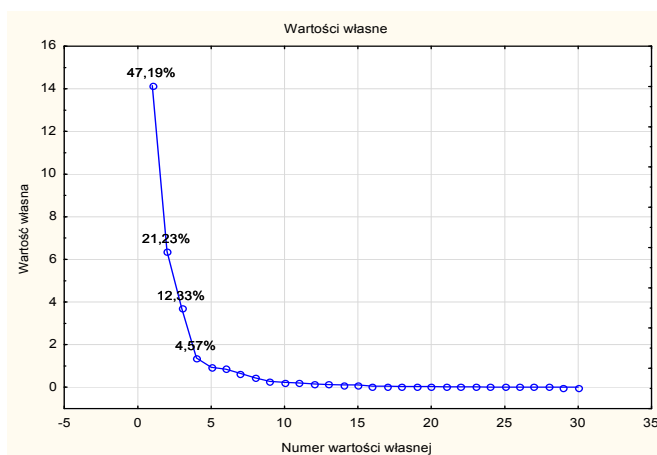


Rys. 6.24. Przebieg cech sygnału intensywności płomienia podczas pomiarów przy mocy $P=400\text{kW}$ i dwóch różnych współczynnikach nadmiaru powietrza

6.2.7. Redukcja liczby cech sygnału płomienia za pomocą analizy składowych głównych

Duża ilość rozpatrywanych cech sygnału 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 cech, które są najsilniej reprezentowane w modelu PCA. Wzięto pod uwagę ogółem 30 cech parametrów opisujących kształt płomienia, których definicje zostały przedstawione w poprzednim rozdziale. Składowe główne zostały wyznaczone na podstawie ogółem 2400 obserwacji.

Na rys. 6.25 pokazano wykres osypiska. Wartość własna dla pierwszej składowej głównej wynosi 14,19, dla drugiej 6,37, trzeciej 3,70, czwartej 1,37 i piątej 0,93. Stanowi to odpowiednio 47,19%, 21,23%, 12,33%, 4,57% i 3,1% udziału w całkowitej wariancji wyjaśnionej. Według kryterium Keisera należy wziąć pod uwagę cztery pierwsze składowe główne, których wartości własne są większe od 1. Regularny spadek wartości własnych staje się wolniejszy od czwartej składowej głównej, czyli na podstawie kryterium Cattella również należy uwzględnić cztery pierwsze składowe główne.



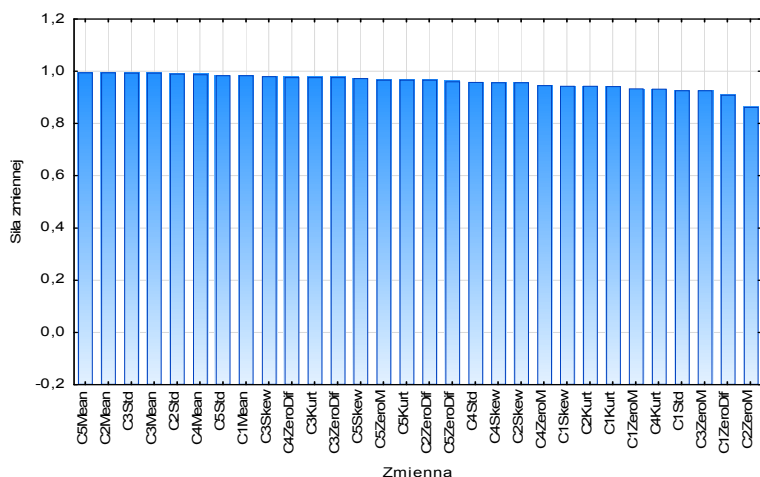
Rys. 6.25. Wartości własne i ich udział w całkowitej wariancji wyjaśnionej

Tabela 6.4 przedstawia współrzędne czynnikowe zmiennych, na podstawie korelacji (ładunki), w celu zaznaczenia zmiennych o największym udziale wyróżnione zostały wartości większe niż 0,7. W pierwszej składowej głównej widoczne jest duże znaczenie wartości średnich (Mean) odchyłeń standardowych (Std) oraz liczby zer pochodnej sygnałów (ZeroDif). Niewiele mniejsze znaczenie ma ją zmienne związane z liczbą przejść przez średnią (ZeroM). W drugiej składowej największe znaczenie mają skośność (Skew) i kurtoza (Kurt). Przedstawione wyniki wskazują, że trudno jest wskazać jedną dominującą zmienną. Potwierdza to również rozkład siły zmiennych P obliczony

na podstawie zależności (5.6) przedstawiony na rys. 6.26. Najmniej znacząca zmienna – liczba przejść przez średnią sygnału kanału 2 – ma siłę prawie 0,9 i nie powinna być pomijana w modelu składowych głównych, a rozpatrywany zbiór parametrów statystycznych płomienia reprezentuje jego zmiany z niewielką redundancją.

Tabela 6.4. Współrzędne czynnikowe zmiennych, na podstawie korelacji (wyróżnione ładunki większe niż 0,7)

	Czynnik - 1	Czynnik - 2	Czynnik - 3	Czynnik - 4
C1Mean	0,81007	0,243707	-0,013972	-0,062530
C2Mean	0,89918	0,271095	0,210090	-0,019484
C3Mean	0,88432	0,295278	0,306984	0,033171
C4Mean	0,84163	0,328621	0,378078	0,101960
C5Mean	0,86141	0,315306	0,279929	0,081542
C1Std	0,40514	0,294011	-0,696371	-0,122222
C2Std	0,81821	0,176056	-0,375065	-0,291642
C3Std	0,86880	0,168255	-0,185648	-0,288945
C4Std	0,87896	0,122488	-0,092595	-0,256246
C5Std	0,83416	0,211614	-0,350716	-0,223326
C1Skew	-0,53182	0,601341	0,122475	0,426969
C2Skew	-0,58471	0,718498	-0,117020	0,192505
C3Skew	-0,47853	0,757507	-0,269821	0,031419
C4Skew	-0,38088	0,716282	-0,334889	-0,052096
C5Skew	-0,52157	0,752050	-0,170251	0,145492
C1Kurt	-0,39328	0,554766	0,306609	0,257242
C2Kurt	-0,50786	0,730498	0,048186	-0,058638
C3Kurt	-0,47039	0,756324	-0,112419	-0,242840
C4Kurt	-0,40616	0,717968	-0,176416	-0,297355
C5Kurt	-0,50748	0,768262	0,017127	-0,160462
C1ZeroM	-0,50656	-0,148256	0,646370	-0,125583
C2ZeroM	-0,66721	-0,012920	0,572855	-0,228865
C3ZeroM	-0,70352	0,007215	0,482015	-0,319818
C4ZeroM	-0,69802	0,028911	0,361444	-0,358474
C5ZeroM	-0,55279	0,010041	0,552386	-0,405730
C1ZeroDif	-0,58605	-0,412082	-0,508832	-0,295692
C2ZeroDif	-0,81396	-0,354299	-0,347725	0,045218
C3ZeroDif	-0,79656	-0,372440	-0,396632	-0,020413
C4ZeroDif	-0,79822	-0,356831	-0,421067	-0,024657
C5ZeroDif	-0,89996	-0,317329	-0,188247	0,099009
War.wyj.	14,15818	6,367658	3,698483	1,372295
Udział	0,47194	0,212255	0,123283	0,045743



Rys. 6.26. Rozkład siły zmiennych.

Oznacza to, że w dalszej analizie będą uwzględniane wszystkie cechy sygnału płomienia.

6.2.8. Analiza ortogonalności

Celem wyznaczania cech sygnału jest zastosowanie ich do diagnostyki procesu spalania pyłu węglowego polegającej na wykrywaniu odchylenia od nominalnego współczynnika nadmiaru powietrza. Ponieważ siła wszystkich obliczonych cech sygnału jest porównywalna należy sprawdzić ortogonalność cech pod kątem zmian współczynnika nadmiaru powietrza.

Tabela 6.5. Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami średnimi dla poszczególnych kanałów

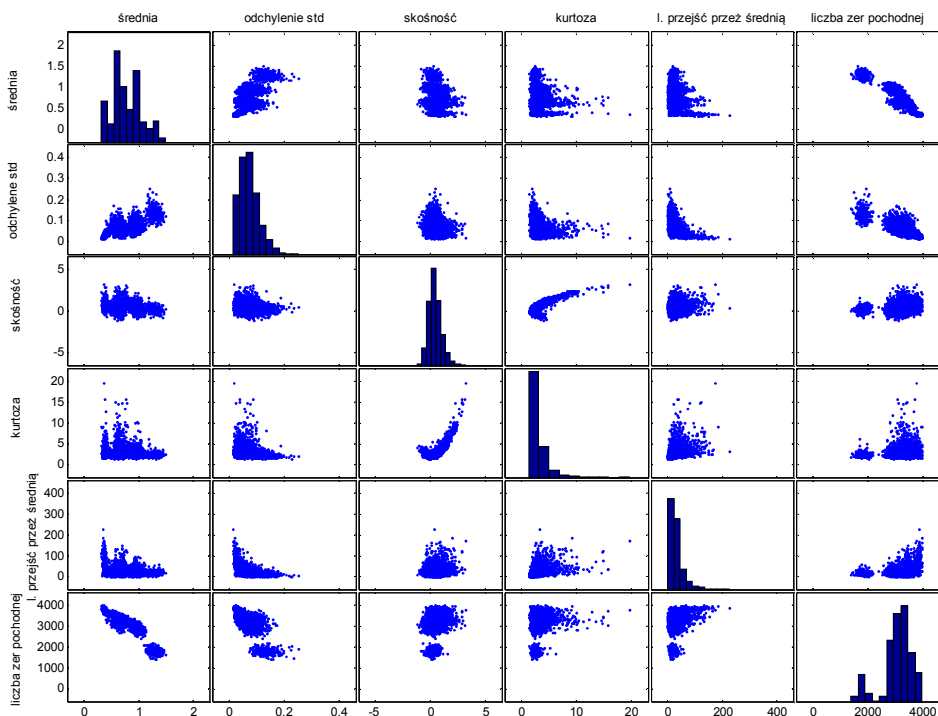
	C1Mean	C2Mean	C3Mean	C4Mean	C5Mean
C1Mean	1	0,93	0,86	0,80	0,89
C2Mean	0,93	1	0,99	0,95	0,98
C3Mean	0,86	0,99	1	0,99	0,99
C4Mean	0,80	0,95	0,99	1	0,98
C5Mean	0,89	0,98	0,99	0,98	1

Na wstępie wykonano analizę współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi. Pierwszy wniosek to dosyć wysoki współczynnik korelacji ($>0,7$) danej cechy w obrębie wszystkich kanałów. Tabela 6.5 zawiera przykładowe wartości dla średniej. Aby wyodrębnić cechy o najmniejszej redundancji wykonane zostały testy współczynnika korelacji pomiędzy nimi dla pojedynczych kanałów. Przykładowo tabela 6.6 zawiera wartości współczynników korelacji pomiędzy cechami dla kanału 5, dla pozostałych kanałów zaobserwowano podobne zachowanie. Najmniejsza wartość współczynnika korelacji, równa 0,18, obserwowana jest dla par cech „skośność” i „liczba przejść przez średnią”.

Największa wartość współczynnika korelacji, równa 0,91, obserwowana jest dla par cech „średnia” i „liczba zer pochodnej”.

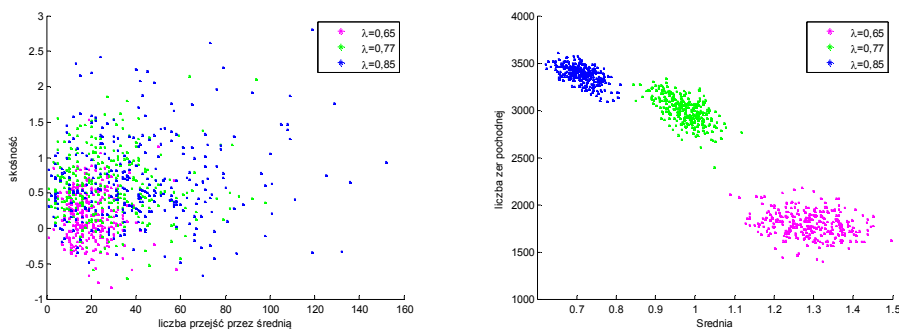
Tabela 6.6. Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami cech dla kanału 5

	C5Mean	C5Std	C5Skew	C5Kurt	C5ZeroM	C5ZeroDif
C5Mean	1,00	0,63	-0,26	-0,20	-0,34	-0,91
C5Std	0,63	1,00	-0,23	-0,25	-0,55	-0,75
C5Skew	-0,26	-0,23	1,00	0,75	0,18	0,27
C5Kurt	-0,20	-0,25	0,75	1,00	0,33	0,20
C5ZeroM	-0,34	-0,55	0,18	0,33	1,00	0,35
C5ZeroDif	-0,91	-0,75	0,27	0,20	0,35	1,00



Rys. 6.27. Wykres rozrzutu dla każdej pary cech dla kanału 5.

W celu sprawdzenia ortogonalności cech wykonano wykres rozrzutu dla każdej pary cech (rys. 6.27). Okazuje się, że para najmniej skorelowana wykazuje jednocześnie najmniejszy rozrzut, praktycznie uniemożliwiający rozróżnienie stanów obiektu. Jednocześnie dla pary o największej korelacji widoczny jest największy rozrzut. Oznacza to, że sama analiza korelacji [8] nie jest wystarczająca do oceny przydatności cech do diagnostyki lub sterowania.



Rys. 6.28. Wykres rozrzutu dla par cech „skośność” i „liczba przejść przez średnią” (a) „średnia” i „liczba zer pochodnej” (b) dla kanału 5

Analiza wykonana dla pojedynczego przypadku (moc 400kW) prowadzi do tych samych wniosków. Na rys. 6.28 pokazano przykładowe rozrzuty dla par cech „skośność” i „liczba przejść przez średnią” (a) „średnia” i „liczba zer pochodnej” (b). W przypadku pierwszej pary pomimo zmieniających się warunków spalania nie jest możliwe wyróżnienie skupień, w przypadku drugiej pary można wyróżnić trzy wyraźne skupienia odpowiadające różnym warunkom spalania. Można to wykorzystać do oceny prawidłowości procesu spalania na podstawie tych cech.

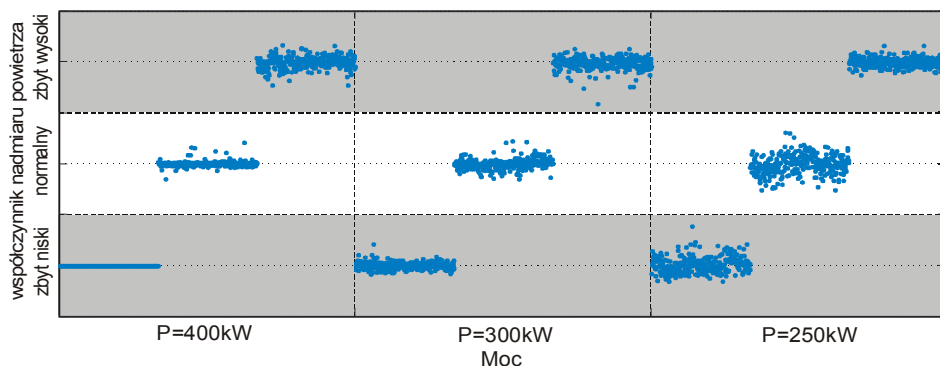
6.2.9. Klasyfikacja z użyciem rozmytych sieci neuronowych (Diagnostyka spalania pyłu węglowego)

Aby informacja o stanie urządzenia była przydatna powinna mieć formę zrozumiałą dla operatora lub automatycznego systemu sterowania i diagnostyki. Analizowany jest przypadek, kiedy nieprawidłowa praca palnika polega na zbyt wysokim lub zbyt niskim współczynniku nadmiaru powietrza, diagnostyka będzie więc polegała na wykrywaniu trzech stanów. W poprzednim rozdziale opisano sposób uzyskiwania sygnałów diagnostycznych, następny krok to prawidłowa klasyfikacja stanów. Istnieje wiele metod klasyfikacji, możliwych do zastosowania w tym przypadku zaczynając od metody Fishera (LDA) aż do bardzo obecnie popularnej metody wektorów nośnych (SVM) czy też sieci neuronowych. Możliwości diagnostyki procesu spalania zostaną pokazane na przykładzie rozmytej sieci neuronowej. Metoda ta daje zazwyczaj wyniki lepsze niż SVM i klasyczne sieci neuronowe [55], poza tym usuwając ostatnią warstwę sieci (wyostrzającą) można uzyskać rozmytą informację ostrzegającą o powstaniu symptomów nieprawidłowego działania (lub awarii) [58].

Zbiór przypadków cech o liczności 2700 pomiarów, został podzielony na część uczącą i testującą – do zbioru testującego został przeniesiony co 5 pomiar. Ponieważ zarówno analiza PCA jak i analiza ortogonalności nie skazywała na możliwość pominięcia którejkolwiek z cech, użyto wszystkich 30. Ze względu

na metodykę badań polegającą na wykonywaniu serii pomiarów podczas których utrzymywano stałe warunki, pomiary były wyraźnie zgrupowane. Wobec tego do określenia liczby funkcji przynależności została użyta analiza skupień metodą klasteryzacji różnicowej (ang. *subtractive clustering*) [289, 347].

Dla sieci trenowanej metodą hybrydową z 25 funkcjami przynależności osiągnięto 100% poprawność klasyfikacji dla zbiorów uczącego i testowego łącznie. Przy pozostawieniu rozmytego wyjścia jest jednak widoczna niepewność, zwłaszcza w obszarze niskiej mocy (rys. 6.29). Wynika to najprawdopodobniej z niższego poziomu sygnału optycznego. Próby dalszego zwiększania liczby reguł nie powodowały znaczącej zmiany niepewności.



Rys. 6.29. Rozmyta klasyfikacja współczynnika nadmiaru powietrza dla różnych mocy palnika

Wynika stąd, że powyższa metoda nadaje się do zastosowania w diagnostyce procesu spalania pyłu węglowego polegającej na klasyfikacji wg prawidłowości współczynnika nadmiaru powietrza. Możliwe było wykrycie odchylenia współczynnika nadmiaru powietrza λ o $\pm 0,1$ od wartości prawidłowej. Z rys. 6.29 wynika również, że istnieje możliwość wykrycia mniejszego odchylenia – zwiększenie czułości metody.

6.2.10. Diagnostyka spalania mieszaniny pyłu węglowego i biomasy

Jak wcześniej wspomniano przedmiotem badań było również współspalanie węgla z biomasą. Dla przykładu zostaną pokazane wyniki dla mieszaniny składającej się z 90% pyłu węglowego i 10% biomasy (rozdrobniona słoma). Mieszanina została przygotowana przed wykonaniem testów spalania. Metodyka pomiarów była taka sama jak w przypadku czystego pyłu węglowego.

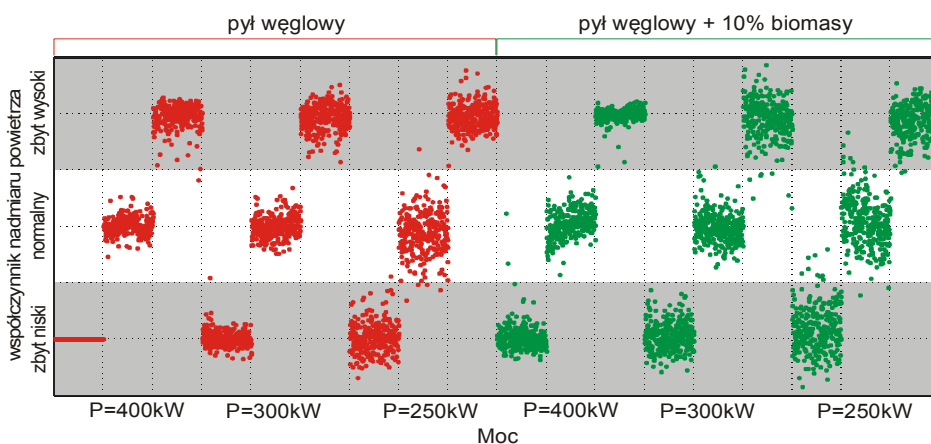
Zbiór przypadków (pomiarów) cech został podzielony na część uczącą i testującą – do zbioru testującego został przeniesiony co 5 pomiar. Uwzględniono wszystkie 30 cech. Do określenia liczby funkcji przynależności również została użyta metoda klasteryzacji różnicowej.

Przy użyciu 31 funkcji przynależności uzyskano błąd klasyfikacji 0,21% dla zbioru trenującego i 1,85% dla zbioru testowego.

Wykonano również testy polegające na trenowaniu sieci zarówno dla czystego pyłu węglowego, jak i jego mieszaniny z biomasą. Uzyskany w ten sposób klasyfikator jest bardziej uniwersalny. Zbiór treningowy posiadał licznosc 4860 przypadków, a zbiór testowy 540 przypadków. Łącznie uwzględniono więc 18 wariantów pracy palnika – 3 poziomy mocy, 3 poziomy współczynnika nadmiaru powietrza i 2 rodzaje paliwa. Tabela 6.7 zawiera zestawienie błędu klasyfikacji stanów dla różnej liczby funkcji przynależności. Widoczne jest, że stosowanie liczby funkcji przynależności mniejszej lub dużo większej niż liczba badanych wariantów (tutaj 18) powoduje wzrost liczby nieprawidłowych klasyfikacji. Przy pozostawieniu rozmytego wyjścia, podobnie jak w przypadku spalania czystego węgla, w obszarze niskiej mocy widoczna zwiększona niepewność (rys. 6.30).

Tabela 6.7. Błąd klasyfikacji stanów spalania węgla i biomasy dla różnej liczby funkcji przynależności

Liczba funkcji przynależności	błędy – zbiór uczący		błędy – zbiór testujący	
	liczba	procent	liczba	procent
17	84	1,73%	9	1,67%
22	38	0,78%	7	1,30%
32	44	0,91%	9	1,67%



Rys. 6.30. Rozmyta klasyfikacja współczynnika nadmiaru powietrza dla różnych mocy palnika i dwóch rodzajów paliwa

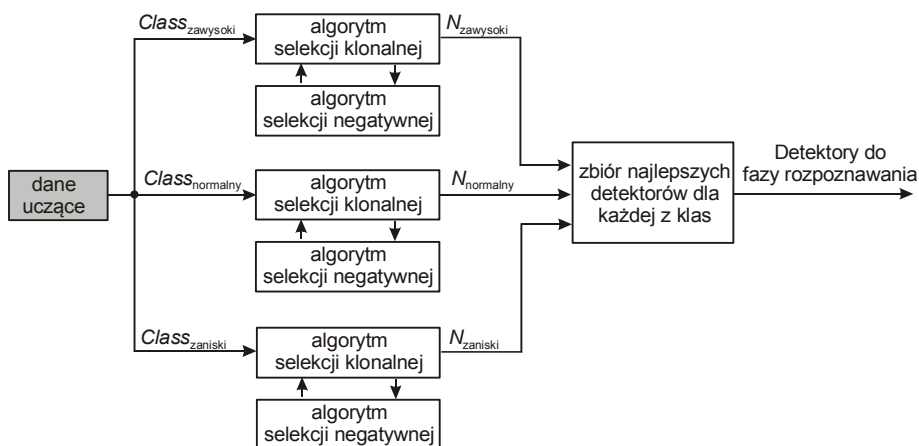
Przy zmianie proporcji licznosci zbiorów uczącego i testującego na 60%/40% uzyskane dokładności klasyfikacji są zdecydowanie gorsze i wynoszą 98,3% oraz 94,2% odpowiednio dla zbioru uczącego i testującego (1,70% i 5,8% błędów). Częściowo jest to spowodowane tym, że niektóre wartości cech zbioru testującego były poza zakresem wartości wyznaczonych w zbiorze uczącym. Sieci neuronowe nie mają zdolności do ekstrapolacji, stąd dodatkowe błędy.

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że zaproponowana powyższa metoda nadaje się do wykrywania odchylenia współczynnika nadmiaru powietrza λ o $\pm 0,1$ od wartości prawidłowej. W przypadku współspalania węgla z biomasą zwiększenie czułości może być utrudnione, zwłaszcza w obszarze małych obciążeń palnika.

Możliwości metody potwierdza również następny test polegający na rozpoznaniu kiedy paliwem jest węgiel, a kiedy węgiel z biomasą tylko na podstawie sygnałów optycznych. Do testów wykorzystano ten sam zbiór 30 cech. i taki sam podział na zbiór uczący i testowy. Dla sieci z 20 funkcjami przynależności prawidłowo rozpoznano 99,9% przypadków w zbiorze testowym i uczącym.

6.2.11. Klasyfikacja z użyciem algorytmów immunologicznych (Diagnostyka spalania pyłu węglowego)

Stosunkowo nową rodziną algorytmów klasyfikacyjnych są sztuczne systemy immunologiczne. Zbadane zostały ich właściwości w zastosowaniu do diagnostyki procesu spalania polegającej na klasyfikacji wg prawidłowości współczynnika nadmiaru powietrza. Badane były przypadki jak opisane w poprzednim rozdziale – dwa rodzaje paliwa, trzy poziomy mocy dla 3 poziomów współczynnika nadmiaru powietrza: normalnego, zbyt wysokiego i zbyt niskiego.



Rys. 6.31. Synteza adaptacyjnych klasyfikatorów binarnych –faza uczenia w algorytmie negatywnej selekcji klonalnej

Wybrane współczynniki dyskretnej transformaty falkowej (DWT) [347] sygnału lokalnej intensywności promieniowania płomienia stanowiły cechy płomienia, a do klasyfikacji użyty został algorytm negatywnej selekcji klonalnej. Ponieważ rozpoznawano trzy klasy klasyfikator zawierał trzy podzbiory detektorów (rys. 6.31). Dane pomiarowe przetworzono za pomocą DWT (Daubechies 6) w oknach o długości 16384 próbek. Następnie obliczono parametry statystyczne

(wartość maksymalna, minimalna i średnia oraz odchylenie standardowe) najbardziej znaczących współczynników transformaty – D1, D2, D3, D4 i A1 otrzymując wektor 20 cech dla każdej klasy. Zbiór cech został podzielony na część uczącą i testującą losowo wg reguły 30%/70% i 70%/30%.

Tabela 6.8. Liczności zbiorów dla poszczególnych klas

Klasa	zbiór uczący	zbiór testowy	razem
λ za wysoko	720	1680	2400
λ prawidłowo	720	1680	2400
λ za nisko	720	1680	2400
Razem	2160	5040	7200
λ za wysoko	1680	720	2400
λ prawidłowo	1680	720	2400
λ za nisko	1680	720	2400
Razem	5040	2160	7200
λ za wysoko	1920	480	2400
λ prawidłowo	1920	480	2400
λ za nisko	1920	480	2400
Razem	5760	1140	7200

Aby uniknąć błędu spowodowanego losowym pobieraniem wzorców treningowych został wykonany również 5-krotny test krzyżowy. W k -krotnym teście krzyżowym zbiór danych jest dzielony na k podzbiorów o podobnej liczności. Uczenie i testowanie algorytmu odbywa k razy. Za każdym razem, jedna z k podgrup jest używana jako zbiór testowy, a pozostałe $k-1$ podzbiory są łączone, tworząc zbiór uczący. Otrzymuje się więc k różnych wyników testowania. Tabela 6.8 zawiera rozkład liczności zbiorów dla każdej z klas.

Najczęstszymi miarami dobroci algorytmu są dokładność, czułość i swoistość. Dokładność wyraża zdolności klasyfikatora do zapewnienia prawidłowej klasyfikacji. Czułość jest miarą zdolności klasyfikatora do wykrycia występowania klasy docelowej. Specyficzność jest miarą zdolności algorytmu do oddzielenia klasy docelowej od reszty klas. Dokładności klasyfikacji zbiorów danych oblicza się następująco:

$$Accuracy(Z) = \frac{\sum_{i=1}^{|Z|} Assess(z_i)}{|Z|}, \quad (6.5)$$

natomiast

$$Assess(z) = \begin{cases} 1, & \text{if } calssify(z) = z.c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6.6)$$

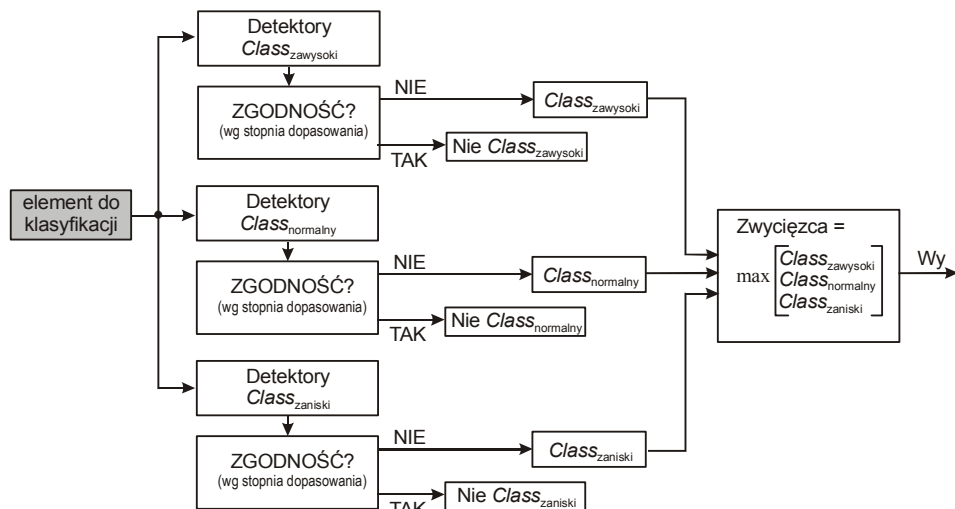
gdzie z to wzorce w zbiorze testowym, a $z.c$ to klasa wzorca z ze zbioru testowego. Czyli miarą dokładności będzie stosunek prawidłowo rozpoznanych wzorców zbioru testowego do liczności zbioru testowego.

Do określenia odpowiednio czułości i swoistości mogą być stosowane następujące wzory:

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (6.7)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (6.8)$$

gdzie TP, TN, FP i FN oznaczają odpowiednio prawidłową klasyfikację przynależności i nieprzynależności do klasy oraz nieprawidłową klasyfikację przynależności i nieprzynależności do klasy.



Rys. 6.32. Faza klasyfikacji w algorytmie negatywnej selekcji klonalnej

Tabela 6.9. Ocena prawidłowości klasyfikacji

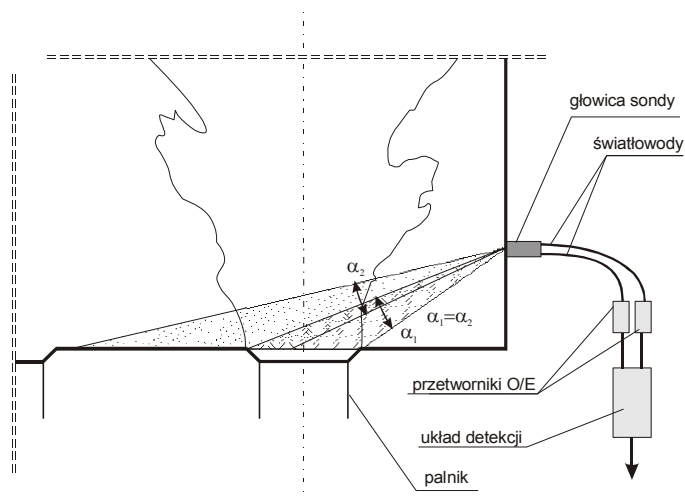
Podział zbiór uczący/zbiór testowy	dokładność	czułość	swoistość
40/60	98,95	99,25	99,10
60/40	99,18	99,20	99,45
80/20 5-krotna próba krzyżowa	98,85	98,75	99,25
średnia	98,99	99,07	99,27

Testy klasyfikacji przeprowadzono z użyciem algorytmu negatywnej selekcji klonalnej wg schematu pokazanego na rys. 6.32. Wyniki testów dla zawiera tabela 6.9. Średnia dokładność dla różnych sposobów podziału na zbiór uczący

i testowy wyniosła 98,99%. Dla klasyfikacji z użyciem sieci rozmytych, średnia dokładność wyniosła 96,4%. Unormowany czas wykonania testów dla obydwu algorytmów był porównywalny – widoczna jest więc przewaga algorytmu immunologicznego w zastosowaniu do klasyfikacji wg prawidłowości współczynnika nadmiaru powietrza, co może zostać wykorzystane do diagnostyki procesu współspalania pyłu węglowego i biomasy w pojedynczym palniku.

6.2.12. Wykrywanie odrywania się płomienia od wieńca palnika wirowego

W najprostszym przypadku diagnostyka palnika obejmuje tylko detekcję obecności płomienia bądź jego zaniku. W niskoemisyjnych palnikach wirowych w normalnych warunkach pracy płomień zapala się przy wieńcu palnika i takie jego położenie jest stabilizowane. W pewnych warunkach pracy palnika (np. przy pracy z małą mocą lub przy bardzo wilgotnym paliwie) może jednak wystąpić zjawisko oderwania się płomienia od wieńca palnika, które niekorzystnie wpływa na przebieg procesu spalania, ponadto może być fałszywie zinterpretowane przez obecnie istniejące czujniki jako zanik płomienia.



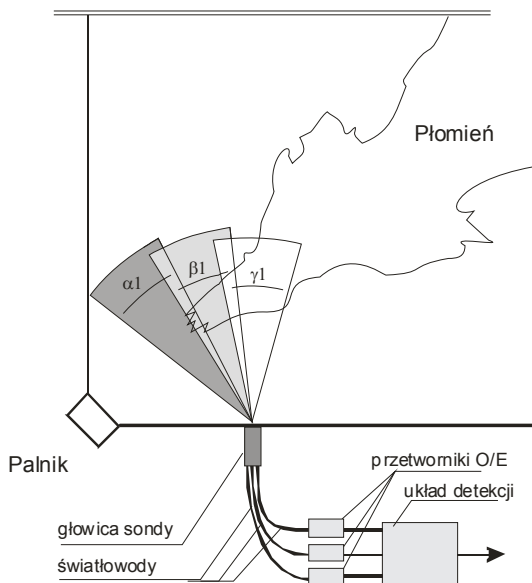
Rys. 6.33. Wykrywanie odrywania się płomienia od wieńca palnika

Światłowodowy czujnik wykrywający oderwanie się płomienia od wieńca palnika niskoemisyjnego [41], np. o konstrukcji opisanej w rozdziale 6.2.1, umieszczony jest na ścianie kotła energetycznego prostopadłej do ściany na której zamontowane są niskoemisyjne palniki wirowe (rys. 6.33). W głowicy czujnika znajdują się dwa światłowody. Pierwszy z nich jest ustawiony tak, aby stożek akceptacji przy odpowiednim ograniczeniu kąta akceptacji światłowodu (α_1) obejmował z lekkim zapasem wieńiec palnika. Drugi światłowód posiada

ograniczenie kąta akceptacji (α_2) identyczne jak w pierwszym i jest obrócony w kierunku wnętrza komory spalania tak, aby kąty akceptacji miały część wspólną. Stożek akceptacji drugiego światłowodu nie obejmuje sąsiednich palników. Osie symetrii palnika i obydwu światłowodów leżą w jednej płaszczyźnie. Światłowody doprowadzone są do przetworników optoelektrycznych, gdzie sygnał optyczny ze światłowodów przetwarzany jest na sygnały elektryczne, zawierające informacje o zmianach intensywności świecenia dna płomienia. Z obydwu sygnałów elektrycznych wydzielana jest następnie składowa zmienna. Zanik składowej zmiennej w sygnale z pierwszego światłowodu przy obecności sygnału zmiennego w sygnale z drugiego oznacza oderwanie się płomienia od wieńca palnika. Stan ten wykrywany jest przez detektor elektroniczny ze standardowym wyjściem elektrycznym.

6.2.13. Położenie strefy zapłonu płomienia w palniku strumieniowym

Podobnie jak w przypadku palników wirowych najprostszym przypadku diagnostyka palnika obejmuje tylko detekcję obecności płomienia bądź jego zaniku. W niskoemisyjnych palnikach strumieniowych zapłon następuje w zmiennej odległości od wylotu palnika. Odległość ta jest zależna od warunków pracy palnika i jest również zmienna w czasie. Obecne czujniki o szerokim polu widzenia nie dają gwarancji prawidłowego działania, ponieważ widzą również fragment jądra płomienia, co może być fałszywie zinterpretowane jako obecność płomienia w danym palniku. Czujniki o wąskim polu widzenia nie obejmują wszystkich możliwych położzeń strefy zapłonu, co może być fałszywie zinterpretowane jako zanik płomienia.



Rys. 6.34. Śledzenie strefy zapłonu płomienia w palniku strumieniowym

W systemie diagnostycznym wykorzystywany jest światłowodowy układ monitorowania płomienia opisany w rozdziale 6.2.1. Sposób wykrywania strefy zapłonu palnika strumieniowego polega na tym, że pomiaru dokonuje się za pomocą co najmniej trzech światłowodów o ograniczonych kątach akceptacji, następnie sygnały optyczne ze światłowodów przetwarza się na sygnały elektryczne, charakterystyczne dla zmian intensywności płomienia, z sygnałów elektrycznych wydziela się składową zmienną. Zanik składowej zmiennej w sygnale jednego ze światłowodów przy nieobecności składowej zmiennej w sygnale z poprzedzającego światłowodu oznacza, że strefa zapłonu znajduje się w stożku widzenia tego światłowodu, natomiast jeżeli składowa zmienna obecna jest w sygnale ze wszystkich światłowodach oznacza, że płomień pali się przy gardzieli palnika, zaś brak składowej zmiennej w sygnale ze wszystkich światłowodów oznacza brak płomienia.

Oczywiście liczba światłowodów i obszarów obserwacji może być większa, zwiększa to dokładność wyznaczania strefy zapłonu i system diagnostyczny może również pełnić funkcję czujnika położenia strefy zapłonu palnika strumieniowego.

7. Podsumowanie i wnioski

Ogień od zarania dziejów służy człowiekowi jako źródło energii. Pomimo tego, że znamy go od tak dawna, proces spalania nie jest jeszcze poznany. Stosunkowo dobrze zbadane jest spalanie gazów i cieczy, natomiast spalanie paliw stałych jest jeszcze nie do końca poznane. Dzięki rozwojowi technologii obliczeniowej możliwe jest coraz dokładniejsze modelowanie procesu spalania za pomocą technik CFD. Wymaga to jednak bardzo dużych mocy obliczeniowych niedostępnych systemom przemysłowym. Proces spalania, 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, zapalenie i wibracje. Problem trudnych warunków pracy nabiera szczególnego znaczenia, gdy diagnostyka procesu odbywa się za pomocą metod optycznych.

Przedstawiona w niniejszej pracy diagnostyka procesu spalania z wykorzystaniem metod optycznych, miała swój początek w badaniach prowadzonych od szeregu lat najpierw w Katedrze Elektroniki, a potem w Instytucie Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Lubelskiej. W ich rezultacie został zaprojektowany i wykonany wielokanałowy, światłowodowy układ monitorowania płomienia przeznaczony do pracy w warunkach przemysłowych. Układ ten daje możliwość wielostrefowego monitorowania płomienia pojedynczego palnika. Ze względu na specyfikę polskiego przemysłu energetycznego znalazł on zastosowanie do monitorowania płomienia pyłowego.

W początkowej fazie rozwoju w analizie korzystano z bardzo prostych wskaźników, ale szybko okazało się, że pomimo olbrzymiej ilości informacji niesionej przez świecenie płomienia jej interpretacja napotyka duże trudności. Zastosowanie klasycznych metod identyfikacji okazało się niewystarczające, naturalne stało się więc zastosowanie metod sztucznej inteligencji.

Podobna technologia rozwijana była niezależnie w Hiszpanii, w Laboratorium Badania Technologii Spalania (LITEC). W pewnym momencie nastąpiło połączenie wysiłków obu zespołów, co zaowocowało opisywanymi w tej monografii wspólnymi badaniami nad spalaniem alternatywnych paliw dla turbin gazowych (AFTUR – 5 Program Ramowy). Badano właściwości spektrometryczne płomieni takich paliw i właściwości pulsacji turbulentnego płomienia gazowego pod kątem zastosowania w diagnostyce i sterowaniu procesem spalania paliw alternatywnych w turbinach gazowych. Drugim opisywanym tutaj wątkiem wspólnych badań (wykonywanych przede wszystkim w Polsce) było badanie metod diagnostycznych przy współspalaniu węgla i biomasy (program Smartburn) [328].

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w niniejszej pracy należy zaliczyć:

- Analizę spektrometryczną płomienia gazowego przy spalaniu paliw alternatywnych w turbinie gazowej. Analiza ta wykazała, że rozkład udziału chemiluminescencji najważniejszych rodników (CH^* , OH^* , C_2^* , CO_2^*) przy różnych obciążeniach termicznych i różnych współczynnikach ekwiwalencji różni się od rozkładu obserwowanego podczas spalania gazu ziemnego w analogicznych warunkach. Zostało w ten sposób wykazane, że dotychczas używana metoda uzyskiwania sygnałów diagnostycznych poprzez obliczenie ilorazów intensywności chemiluminescencji par rodników, w przypadku paliw alternatywnych może prowadzić do błędnych wniosków.
- Opracowanie metody diagnostyki prawidłowości współczynnika ekwiwalencji w warunkach spalania ubogiej mieszanki gazowej w pobliżu progu palności i doświadczalne wykazanie jej poprawności. W metodzie tej dodatkowo wykorzystywana jest informacja zawarta w dynamice emisji płomienia. Metoda daje prawidłowe wyniki zarówno dla spalania czystego gazu ziemnego, jak i paliw alternatywnych – biogazu i gazu syntezowego. Przy wykorzystaniu tylko dwóch cech intensywności w dwóch zakresach widmowych promieniowania płomienia, niepewność oceny poprawności współczynnika ekwiwalencji nie przekracza 10% nawet dla paliwa zawierającego 50% ditlenku węgla. Ponieważ zależność zaproponowanych cech emisji płomienia od współczynnika ekwiwalencji nie jest do końca znana do klasyfikacji stanów została użyta rozmyta sieć neuronowa.
- Opracowanie metody diagnostyki spalania gazu ziemnego w przemysłowym palniku kinetyczno dyfuzyjnym polegającą na klasyfikacji stanu na bazie „płomieni wzorcowych” z użyciem klasyfikatorów Kohonena. Sygnały diagnostyczne – cechy płomienia wyznaczane były na podstawie wartości średniej i odchylenia standardowego w oknie czasowym sygnału intensywności w paśmie akceptowanym przez fotopowielacz.
- Opracowanie metody diagnostyki spalania pyłu węglowego w pojedynczym palniku mającej za zadanie wykrycie zbyt wysokiego i zbyt niskiego poziomu nadmiaru powietrza. Poprawność metody została doświadczalnie wykazana dla palnika wirowego. Badania obejmowały opracowanie geometrii widzenia sondy optycznej, opracowanie cech sygnału z sondy optycznej istotnych z punktu widzenia zadania diagnostycznego oraz opracowanie metody klasyfikacji stanu pracy palnika na podstawie wyznaczonego wektora cech. Ponieważ zależność cech emisji płomienia od nadmiaru powietrza nie jest do końca znana do klasyfikacji stanów została użyta rozmyta sieć neuronowa. Dla badanych

warunków pracy palnika osiągnięto praktycznie 100% dokładność klasyfikacji.

- Opracowanie metody diagnostyki spalania pyłu węglowego z dodatkiem biomasy w pojedynczym palniku mającej za zadanie wykrycie zbyt wysokiego i zbyt niskiego poziomu nadmiaru powietrza. Poprawność metody została doświadczalnie wykazana dla palnika wirowego. Badania obejmowały opracowanie cech sygnału z sondy optycznej istotnych z punktu widzenia zadania diagnostycznego oraz opracowanie metody klasyfikacji stanu pracy palnika na podstawie wyznaczonego wektora cech. Do klasyfikacji stanów została użyta rozmyta sieć neuronowa. Metoda działała poprawnie zarówno dla czystego pyłu węglowego, jak i dla mieszaniny z biomasą. Dla badanych warunków pracy palnika dokładność klasyfikacji wynosiła ponad 97%.
- Zastosowanie sztucznych systemów immunologicznych do klasyfikacji stanów w diagnostyce spalania pyłu węglowego z dodatkiem biomasy w pojedynczym palniku mającej za zadanie wykrycie zbyt wysokiego i zbyt niskiego poziomu nadmiaru powietrza. Sztuczne systemy immunologiczne to algorytmy stosunkowo niedawno opracowane i według wiedzy autora nie były stosowane w diagnostyce spalania. Rezultaty są bardzo obiecujące – dla badanych warunków pracy palnika dokładność klasyfikacji wynosiła ponad 98%.
- Opracowanie metody wykrywania odrywania się płomienia od wieńca palnika wirowego. W metodzie tej zamiast pojedynczego detektora używane są dwa, do których sygnał optyczny doprowadzany jest za pomocą odpowiednio ustawionych światłowodów. Metoda ta zapobiega również fałszywym alarmom o zaniku płomienia.
- Opracowanie metody wykrywania położenie strefy zapłonu płomienia w palniku strumieniowym. Metoda pozwala na wykrycie sytuacji, w której obszar zapłonu przesunął się poza dopuszczalne granice. Obecnie stosowane układy nie dają takiej funkcji.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki analiz i badań nie wyczerpują wszystkich problemów związanych z diagnostyką płomieni z użyciem metod optycznych. Doskonalenia wymagają zarówno metody ekstrakcji cech sygnału intensywności płomienia, jak i metody klasyfikacji stanów pracy. Przedstawione badania miały za zadanie przede wszystkim sprawdzenie poprawności proponowanych metod diagnostyki. Dalsze badania powinny być prowadzone w kierunku zwiększenia dokładności i czułości tych metod. Nie jest również wykluczone, że technologie spalania które będą stosowane w przyszłości nie będą wymagały całkiem nowych metod diagnostycznych.

8. Bibliografia

1. T. Chmielniak, „2011 – Szanse i bariery w rozwoju technologii energetycznych paliw kopalnych”, *Polityka Energetyczna*, tom 14, nr 2, ss. 23–34, 2011.
2. R. Wilk, „Energetyka a ochrona środowiska”, w *Materiały konferencyjne "Spalanie węgla '99"*, Wrocław, 1999.
3. J. Costella, *The Climategate Emails*, Melbourne, Australia: The Lavoisier Group, March 2010.
4. The Science and Public Policy Institute (SPPI), „Science and Public Policy”, Sire Studios, 2012, <http://scienceandpublicpolicy.org/>. Data uzyskania dostępu: 10.10.2012.
5. W. Kordylewski, Red., *Spalanie i paliwa*, 5 red., Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
6. C. Romero, X. Li, S. Keyvan, R. Rossow, „Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control”, *Applied Thermal Engineering*, nr 25, ss. 659–676, 2005.
7. W. Wójcik, K. Gromaszek, A. Kotyra, Z. Jagiełło, „Opracowanie modeli dla kompleksowego systemu sterowania procesem spalania w kotle energetycznym”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, ss. 136–139, 2010.
8. M. Xu, J. L. T. Azevedo, M. G. Carvalho, „Modeling of a front wall fired utility boiler for different operating conditions”, *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering*, nr 190(28), ss. 3581–3590, 2001.
9. E. Ranzi, T. Faravelli, P. Gaffuri, A. Sogaro, „Low-temperature combustion: automatic-generation of primary oxidation reactions and lumping procedures”, *Combustion and Flame*, nr 102(1/2), ss. 179–192, 1995.
10. P. Basu, S. Mitra, „Application of an expert system to the design of a furnace of a circulating fluidized bed boiler”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *Transactions of the ASME*, tom 116, nr 3, ss. 462–467, 1994.
11. W. S. Cho, S. D. Roh, S. W. Kim, W. H. Jang, S. S. Shon, „The process modeling and simulations for the fault diagnosis of rotary kiln incineration process”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, nr 4(2), ss. 99–104, 1998.

12. S. Tronci, R. Baratti, A. Servida, „Monitoring pollutant emissions in a 4.8 MW power plant through neural network”, *Neurocomputing*, nr 43, ss. 3–15, 2002.
13. A. Z. S. Chong, S. J. Wilcox, J. Ward, „Prediction of gaseous emissions from a chain grate stoker boiler using neural networks of ARX structure”, *IEE Proc Sci Measure Technol*, nr 148(3), ss. 95–102, 2001.
14. A. Z. S. Chong, S. J. Wilcox, J. Ward, „Application of neural network-based controller on an industrial chain grate stoker boiler”, *J Inst Energy*, nr 73(497), ss. 208–214, 2000.
15. A. Z. S. Chong, S. J. Wilcox, J. Ward, „The development of a neural network based system for the optimal control of chain-grate stoker-fired boilers”, *Proc ASME Heat Transf Div*, nr 363(3), ss. 103–109, 2000.
16. M. Elshafei, M. A. Habib, M. Al-Dajani, „Prediction of Boilers Emission using Polynomial Networks”, w *Electrical and Computer Engineering*, 2006. CCECE '06. Canadian Conference on, Montreal, Canada, 2006.
17. H.-S. Park, K.-W. Jang, S.-K. Oh, T.-C. Ahn, „Evolutionary design of Self-Organizing Fuzzy Polynomial Neural Networks for modeling and prediction of NO_x emission process”, w *SICE-ICASE*, 2006. International Joint Conference, Bexco, Busan, Korea, 2006.
18. J. Arabas, L. Białobrzeski, P. Domański, K. Świrski, T. Chomiak, „Optymalizacja kotła pyłowego, obniżenie emisji NO_x przy wykorzystaniu sieci neuronowych – metody soft computing”, *Energetyka, Problemy energetyki, Gospodarki Paliwowo-Energetycznej*, nr 1, ss. 21–23, 1998.
19. J. Arabas, P. Domański, K. Świrski, „Soft Computing – wybrane zastosowania w energetyce”, w *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Diagnostyka jakości spalania w energetyce”*, Ustroń-Zawodzie, 1998.
20. L.-G. Zheng, H. Zhou, K.-F. Cen, C.-L. Wang, „A comparative study of optimization algorithms for low NO_x combustion modification at a coal-fired utility boiler”, *Expert Systems with Applications*, nr 36, ss. 2780–2793, 2009.
21. W. Kordylewski, *Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce*, W. Kordylewski, Red., Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
22. W. Strahle, „Combustion noise”, *Progress in Energy and Combustion Science*, nr 4, ss. 157–176, 1978.
23. G. Patela, R. Patela, „Diagnostics possibilities on the basis of premixed flame noise levels”, *Combustion and Flame*, nr 52, ss. 137–147, 1983.

24. A. Dowling, S. Stow, „Acoustic analysis of gas turbine combustors”, *Journal of Propulsion and Power*, tom 19, nr 5, ss. 751–763, 2003.
25. J. Wach, „Zastosowanie tomografii akustycznej do wyznaczania rozkładu temperatury w kotle”, w *Materiały konferencyjne "Diagnostyka jakości spalania w energetyce, Ustroń-Zawodzie, 1998*.
26. N. C. Hii, C. K. Tan, Z. Alex, S. Chong, J. Wilcox, „The Measurement Of Pulverised Fuel Flows by High Frequency Acoustic Emission Techniques”, w *7th INFUB, Porto, 2006*.
27. W. Wójcik, „The utilisation of flame flicker in the fiber-optic system for combustion quality”, w *EUROSENSORS IX, Warsaw, 1997*.
28. A. Sanz, J. Ballester, R. Hernandez, L. M. Cerecedo, „Advanced monitoring of industrial burners based on fluctuating flame signals.”, *Fuel*, nr 87, ss. 1063–1075, 2008.
29. A. R. Jones, „Flame failure detection and modern boilers”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, nr 21, ss. 921–928, 1988.
30. E. Adamson, R. Cumming, „Boiler flame monitoring system for low NOx applications – an update”, w *Proceedings of the American Power Conference, Chicago, 1997*.
31. P. Martin, „Actual state of technology of flame monitoring and validation”, w *International Conference of Exhibition & Training Program Part 2, Chicago, USA, 1993*.
32. W. Wójcik, A. Smolarz, A. Kotyra, C. Wojciechowski, P. Komada, „Optimisation of optical fibre probe for flame monitoring by application of finite elements method”, w *Proceedings on 2-nd International Symposium on "Microelectronics Technologies and Microsystems", Lviv, 1998*.
33. Wójcik, Gotra, Smolarz, Kotyra, „Układ pomiarowy do monitorowania pracy palników naściennych”. *Polska Patent PL190243B1, 26.03.1999*.
34. W. Wójcik, A. Kotyra, A. Smolarz, C. Wojciechowski, „Application of wavelet transformation for analysis of measurements in fibre optic flame monitoring system”, *Proceedings of SPIE*, tom 4239, ss. 96–101, 2000.
35. W. Wójcik, T. Biegański, A. Kotyra, A. Smolarz, „Forecasting of changes of flame flickering in coal flame burner”, *Proceeding of SPIE*, tom 3189, ss. 100–109, 1997.
36. N. C. Hii, C. K. Tan, A. Z. S. Chong, S. J. Wilcox, J. Ward, „The Use of Flame Imaging Techniques to Monitor Pulverised Coal Flames Using Artificial Intelligence Techniques”, w *Proceedings of IMECE2005, Orlando, 2005*.

37. S. A. Kalogirou, „Artificial intelligence for the modeling and control of combustion process: a review”, *Progress in Energy and Combustion Science*, tom 29, nr 6, ss. 515–566, 2003.
38. J. Ward, „The Application of Artificial Intelligence Techniques in Combustion Systems”, w *Artificial Intelligence in Energy and Renewable Energy Systems*, Nova publishers, 2006, ss. 363–394.
39. A. Matsuzaki, T. Yamanaka, A. Hashimoto, A. Sakamoto, K. Sato, K. Yoshikawa, N. Watanabe, N. Hiraki, M. Iida, „New products for boiler safety operation”, w *Proceedings on International Power Conference*, San Diego, 1991.
40. J. B. Michel, O. Chetelat, N. Weber, O. Sari, „Flame signature as a low-cost flame control method”, w *5th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, Lisbon, Portugal, 1999.
41. H. S. Chong, C. K. Tan, S. J. Wilcox, S. M. Thai, J. Ward, G. Andrews, „Development of an intelligent flame monitoring system for gas-fired steel reheating furnaces”, w *5th European Thermal-Sciences Conference*, Eindhoven, the Netherlands, 2008.
42. W. Wójcik, Z. Gotra, A. Kotyra, A. Smolarz, „Światłowodowy czujnik zaniku płomienia w pojedynczym palniku”. PL Patent PL190246B1, 30.11.2005.
43. W. Wójcik, A. Smolarz, W. Zieliński, A. Kotyra, „Sposób wykrywania odrywania się płomienia od wieńca niskoemisyjnego palnika wirowego i czujnik do wykrywania oderwania się płomienia od wieńca niskoemisyjnego palnika wirowego”. PL Patent PL190015B1, 31.10.2005.
44. J. S. Marques, P. M. Jorge, „Visual inspection of a combustion process in a thermoelectric plant”, *Signal Processing*, nr 80, ss. 1577–1589, 2000.
45. M. Chimenti, C. Di Natali, G. Mariotti, E. Paganini, G. Pieri, O. Salvetti, „An IR image processing approach for characterising combustion instability”, *Infrared Physics and Technology*, tom 46, ss. 41–47, 2006.
46. N. Kurihara, M. Nishikawa, A. Watanabe, „A combustion diagnostics method for pulverized coal boilers using flame image recognition technology”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Tom 1, nr 2, ss. 99–103, 1986.
47. J. Gibbins, Y. M. Lin, S. Bowden, S. Cameron, „Video observations of full-size pulverised coal flames”, *Combustion Science and Technology*, nr 162, ss. 263–280, 2001.
48. W. Wójcik, A. Kotyra, T. Golec, K. Gromaszek, „Monitorowanie procesu spalania za pomocą kamery”, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 3, ss. 241–243, 2008.

49. W. B. Baek, S. J. Lee and C. H. Cho, „Flame image processing & analysis for optimal firing of thermal power plant”, IEEE International Symposium on Industrial Electronic, tom.2, ss. 928–931, 2001.
50. J. Smart, G. Lu, Y. Yan, G. Riley, „Characterisation of an oxy-coal flame through digital imaging”, Combustion and Flame, tom 157, nr 6, ss. 1132–1139, 2010.
51. A. Kotyra, W. Wójcik, „Diagnostyka procesu spalania pyłu węglowego wykorzystująca analizę obrazu”, Automatyka, tom 12, ss. 521–529, 2008.
52. A. Kotyra, W. Wójcik, T. Golec, P. Komada, „Assesment of flame stability based on its image features”, Proceeding of SPIE, Lightguides and Their Applications, tom 6608, ss. 283–287, 2007.
53. C. Lou, H. Zhou, P. Yu, Z. Jiang, „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, nr 31, ss. 2771–2778, 2007.
54. L. Xu, Y. Yan, S. Cornwell, G. Riley, „On-line fuel identification using digital signal processing and fuzzy inference techniques”, IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, tom 53, nr 4, ss. 1316–1320, 2004.
55. L. Xu, C. Tan, X. Li, Y. Cheng, X. Li, „Fuel-Type Identification Using Joint Probability Density Arbiter and Soft-Computing Techniques”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, tom 61, nr 2, ss. 286 – 296, 2012.
56. L. Xu, C. Tan, X. Li, X. Li, „On-line Identification of Fuel Type Using Joint Probability Density Arbiter and Support Vector Machine Techniques”, w Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, Austin, USA, 2010.
57. Przedsiębiorstwo Wdrożeń Przemysłowych „WILPO“ Spółka z o.o., „SYSTEM POMIARU PARAMETRÓW JAKOŚCI WĘGLA WILPO C 431”, Przedsiębiorstwo Wdrożeń Przemysłowych „WILPO“ Spółka z o.o., <http://www.wilpo.com.pl/>. Data uzyskania dostępu: 30.06.2013.
58. J. Korbicz, J. Kościelny, Z. Kowalczyk, W. Cholewa, Diagnostyka procesów, metody sztucznej inteligencji, zastosowania, J. Korbicz, J. Kościelny, Z. Kowalczyk, W. Cholewa, Redaktorzy, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
59. J. Ballester, T. García-Armingol, „Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames”, Progress in Energy and Combustion Science, nr 36, ss. 375–411, 2010.

60. F. Rodriguez, E. Tova, V. Cortes, L. Cañadas, „OPTICOM: Advanced automatic monitoring system of local combustion conditions for improving boiler performance in PC power plants”, *Fuel*, nr 81, ss. 637–645, 2002.
61. T. N. Demayo, V. G. McDonnell, G. S. Samuelsen, „Robust active control of combustion stability and emissions performance in a fuel-staged natural gas-fired industrial burner”, *Proceedings of the Combustion Institute*, tom 29, nr 1, ss. 131–138, 2002.
62. V. Venkat, R. Raghunathan, Y. Kewen, K. N. Surya, „A review of process fault detection and diagnosis, Part I: Quantitative model-based methods”, *Computers and Chemical Engineering*, nr 27, ss. 293–311, 2003.
63. R. Isermann, P. Ballé, „Terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis”, 1996.
64. R. Isermann, „Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications”, *Annual Reviews in Control*, nr 29, ss. 71–85, 2005.
65. I. Glassman, *Combustion*, London: Academic Press, 1987.
66. R. Fristrom, *Flame structure and processes*, London: Oxford University Press, 1995.
67. J. Jarosiński, *Techniki czystego spalania*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1996.
68. W. Jost, *Explosions und Verhennungs-vorgange in Gasen*, Berlin: Springer, 1939.
69. V. Spejšer, *Sžiganie gaza na elektrostancijach i vpromyšlennosti*, Moskva: Energija, 1967.
70. J. Chomiak, *Combustion a Study in Theory, Facts and Application*, New York: Abacus Press/Gordon and Breach, 1990.
71. B. Lewis, G. v. Elbe, *Combustion Flames and Explosions of Gases*, New York, London: Academic Press, New, 1961.
72. J. Ballester, A. Sanz, M. González, „Investigation on the characteristics and stability of air-staged flames”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, nr 32, ss. 776–790, 2008.
73. V. Vaezi, R. Aldredge, „Influences of acoustic instabilities on turbulent-flame propagation”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, nr 20, ss. 162–169, 2000.
74. K. Wohl, N. M. Kapp, C. Gazley, „Stability of open flames”, w 3rd Symposium on Combustion, Flame and Explosion Phenomena, New York, 1949.
75. J. Warnatz, „Chemistry of high temperature combustion of alkanes up to octane”, w 20th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1984.

76. J. Warnatz, „Resolution of gas phase and surface combustion chemistry into elementary reactions”, w 24th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1992.
77. J. Szargut, *Termodynamika Techniczna*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991.
78. A. H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion*, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
79. S. Wójcicki, *Spalanie*, Warszawa: WNT, 1969.
80. T. Griffin, D. Winkler, M. Wolf, C. Appel, J. Mantzaras, „Staged Catalytic Combustion Method for the Advanced Zero Emissions Gas Turbine Power Plant”, w ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, Vienna, Austria, 2004.
81. T. Furuya, K. Sasaki, Y. Hanakata, T. Ohhashi, M. Yamada, T. Tsuchiya, Y. Furuse, „Development of a hybrid catalytic combustor for a 1300°C class gas turbine”, *Catalysis Today*, tom 26, nr 3–4, ss. 345–350, 1995.
82. R. A. Dalla Betta, T. Rostrup-Nielsen, „Application of catalytic combustion to a 1.5 MW industrial gas turbine”, Ralph A. Dalla Betta, Thomas Rostrup-Nielsen, tom 47, nr 1–4, ss. 369–375, 1999.
83. A. Miller, *Układy gazowo-parowe na paliwo stałe*, Warszawa: WNT, 1993.
84. M. Ściążko, „Węgiel kamienny – podstawowy surowiec dla energetyki”, w *Materiały konferencyjne "Spalanie węgla '99"*, Wrocław, 1996.
85. B. Miller, *Coal Energy Systems*, London: Academic Press, 2005.
86. J. Speight, *Handbook of coal analysis*, New Jersey: J. Wiley & Sons, 2005.
87. J. Tatsch, *Coal deposits: Origin, evolution, and present characteristics*, Sudburgh: Tatsch Associates, 1980.
88. D. Van Krevelen, *Coal: Typology–Physics–Chemistry–Constitution*, Third Ed. red., Amsterdam: Elsevier Science, 1993.
89. M. Elliott, *Chemistry of Coal Technology*, tom Second Suppl., M. Elliott, Red., New York: J. Wiley & Sons, 1981.
90. N. Berkowitz, *An Introduction to Coal Technology*, New York: Academic Press, 1979.
91. L. D. Smoot, Red., *Fundamentals of Coal Combustion. For clean and efficient use*, Amsterdam, New York: Elsevier, 1993.
92. P. K. Agarwal, „A single particle model for the evolution and combustion of coal volatiles”, *Fuel*, tom 65, nr 6, ss. 803–810, June 1986.

93. Y. Juan, Z. Ming-chuan, Z. Jian, „Experimental and numerical investigations on the interactions of volatile flame and char combustion of a coal particle”, *Proceedings of the Combustion Institute*, nr 32, ss. 2037–2042, 2009.
94. R. Žajdlík, L. Jelemenský, B. Remiarová, J. Markoš, „Experimental and modelling investigations of single coal particle combustion”, *Chemical Engineering Science*, nr 56, ss. 1355–1361, 2001.
95. H. Karcz, W. Jodkowski, „Proces spalania pyłu węglowego”, w *Materiały konferencyjne Spalanie węgla '99, Ustroń-Zawodzie*, 1999.
96. A. M. Carpenter, „Coal blending for power stations”, London, 1995.
97. E. Mon, N. R. Amundson, „Diffusion and reaction in a stagnant boundary layer about a carbon particle. 2. An extension.”, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, nr 17, ss. 313–321, 1978.
98. S. V. Sotirchos, N. R. Amundson, „Diffusion and reaction in a char particle and in the surrounding gas phase. Two limiting models”, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, nr 23, 1984.
99. S. Sundaresan, N. R. Amundson, „Diffusion and reaction in a stagnant boundary layer about a carbon particle. Pseudosteady-state structure and parameter sensitivity”, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, nr 19, ss. 344–351.
100. C. R. Xu, W. B. Fu, „Study on the burning rate of carbon particles under forced convection conditions”, *Combustion Science and Technology*, nr 124, ss. 167–182, 1997.
101. W. B. Fu, S. M. Zheng, „A simple method for calculating burning rate of char/carbon particles under oxygen concentration change”, *Combustion Science and Technology*, nr 118, ss. 397–408, 1996.
102. H. Karcz, W. Kordylewski, W. Rybak, „Charakterystyki spalania węgla”, *Archiwum termodynamiki*, tom 4, 1983.
103. A. Sarofim, J. Howard, A. Padia, „The Physical Transformation of the Mineral Matter in Pulverized Coal Under Simulated Combustion Conditions”, *Combustion Science and Technology*, tom 16, nr 3, ss. 187–204, September 1977.
104. A. Pinto, Gollahalli, „Experimental Studies on the structure of pulverized coal flames”, *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science*, tom 59, ss. 64–69, 1979.
105. D. K. Zhang, T. F. Wall, „Analysis of the ignition of coal dust cloud”, *Combustion and Flame*, tom 92, ss. 475–480, 1992.
106. X. Du, C. Gopalakrishnan, K. Annamalai, „Ignition and combustion of coal particle streams”, *Fuel*, tom 74, nr 4, ss. 487–494, 1995.

107. R. H. Klemens, Mechanizm propagacji i struktura płomienia w mieszaninach pyłowopowietrznych i hybrydowych, tom 151, Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1993.
108. S. C. Saxena, „Devolatilization and combustion characteristics of coal particles”, Progress in Energy and Combustion Science, tom 16, nr 1, ss. 55–94, 1990.
109. J. Żelkowski, Kohleverbrennung: Brennstoff, Physik und Theorie, Technik, Essen: VGB-Kraftwerkstechnik GmbH, 1986.
110. D. A. Tillman, Wood Combustion: Principle, Processes, and Economics, Nowy York: Academic Press Inc., 1981.
111. S. Prusiński, Chemia drewna, Warszawa: PWRiL, 1984.
112. J. Werther, M. Saenger, E.-U. Hartge, T. Ogada, Z. Siagi, „Combustion of agricultural residues”, Progress in Energy and Combustion Science, tom 26, nr 1, ss. 1–27, 2000.
113. T. Golec, „Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych”, Energetyka, nr 7/8, ss. 437–445, lipiec 2004.
114. A. Williams, M. Pourkashanian, J. M. Jones, „Combustion of pulverised combustion and biomass”, Progress in Energy and Combustion Science, nr 27, ss. 587–610, 2001.
115. B. Świątkowski, B. Kozdryk, „Wybrane zagadnienia w modelowaniu numerycznym kotłowych komór spalania”, Archiwum Spalania, tom 5, nr 1–4, ss. 39, 2005.
116. M. G. Carvalho, T. Farias, P. Fontes, „Predicting Radiative Heat Transfer in Absorbing, Emitting, and Scattering Media Using the Discrete Transfer Method”, Fundamentals of Radiation Heat Transfer, nr 160, ss. 17–26, 1991.
117. Fluent. Inc., ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, Centerra Resource Park Lebanon, NH 03766: Fluent. Inc., 2009.
118. R. Siegel, J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, Washington D.C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
119. A. F. Peters, R. Weber, „Mathematical Modeling of a 2.4 MW Swirling Pulverized Coal Flame”, Combust. Sci and Tech., nr 122, ss. 131–182, 1997.
120. T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman, „Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model”, ASME Journal of Heat Transfer, nr 104, ss. 602–608, 1982.
121. A. Sarofim, H. Hottel, „Radiative Transfer in Combustion Chambers: Influence of Alternative Fuels”, w Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference, Hemisphere, Washington, 1978.

122. S. Tabanfar, M. Modest, „Combined Radiation and Convection in Absorbing, Emitting, Nongray Gas-Particulate Tube Flow”, *Journal of Heat Transfer*, tom 109, nr 2, ss. 478–485, 1987.
123. M. Casey, T. Wintergerste, *Best practices guidelines*, Bruxelles: ERCOFTAC, 2000.
124. D. Choudhury, *Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling*. Technical Memorandum TM-107, Fluent Inc., 1993.
125. J. H. Ferziger, M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 1996.
126. J. Smagorinsky, „General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment”, *Month. Wea. Rev.*, nr 91, ss. 99–164, 1965.
127. B. F. Magnussen, B. H. Hjertager, „On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion”, w 16th Symp. (Int'l.) on Combustion, Cambridge, Massachusetts, 1976.
128. J. M. Duclos, D. Veynate, T. Poinso, „A comparison of Flamelet model for premixed turbulent combustion”, *Combustion and Flame*, tom 95, nr 1–2, ss. 101–117, 1993.
129. V. Zimont, „Gas Premixed Combustion at High Turbulence. Turbulent Flame Closures Model Combustion Model”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, nr 21, ss. 179–186, 2000.
130. V. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, W. Weisenstein, „An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Numbers Based on a Turbulent Flame Speed Closure”, *Journal of Gas Turbines Power*, nr 120, ss. 526–532, 1998.
131. V. L. Zimont, A. N. Lipatnikov, „A numerical model of premixed turbulent combustion of gases”, *Chem. Phys. Reports*, tom 14, nr 7, ss. 993–1025, 1995.
132. A. M. Eaton, L. D. Smoot, C. N. Eatough, „Components, formulations, solutions, evaluation and application of comprehensive combustion models”, *Progress in Energy and Combustion Science*, nr 25(4), ss. 387–436, 1999.
133. H. Kobayashi, J. B. Howard, A. F. Sarofim, „Coal Devolatilization at High Temperatures. The Combustion Institute, .”, w 16th Symp. (Int'l.) on Combustion, The Combustion Institute, 1976.
134. T. H. Fletcher, A. R. Kerstein, R. J. Pugmire, M. S. Solum, D. M. Grant, „Chemical percolation model for devolatilization: 3. Direct use of NMR data to predict effects of coal type”, *Energy and Fuels*, nr 6(4), ss. 414–431, 1992.

135. S. Wang, H. Lu, Y. Zhao, R. Mostofi, H. Kim, L. Yin, „Numerical study of coal particle cluster combustion under quiescent conditions”, *Chemical Engineering Science*, tom 62, ss. 4336–4347, 2007.
136. I. W. Smith, „The Combustion Rates of Coal Chars: A Review”, w 19th Symp. (Int'l.) on Combustion, 1982.
137. B. F. Magnussen, „On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow”, w Nineteenth AIAA Meeting, St. Louis, 1981.
138. D. Spalding, „Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames”, w 13th Symp. (Int'l.) on Combustion, 1970.
139. K. K. Y. Kuo, *Principles of Combustion*, New York: John Wiley and Sons, 1986.
140. F. Mainardi, Y. Luchko, G. Pagnini, „The fundamental solution of the space-time fractional diffusion equation”, *Fractional Calculus and Applied Analysis*, tom 2, nr 4, ss. 153–192, 2001.
141. R. Metzler, J. Klafter, „The random walk's guide to anomalous diffusion: a fractional dynamics approach”, *Physics Reports*, nr 339, ss. 1–77, 2000.
142. R. Metzler, W. G. Glöckle, T. F. Nonnenmacher, „Fractional model equation for anomalous diffusion”, *Physica*, tom 211A, nr 1, ss. 13–24, 1994.
143. M. Ciesielski, J. Leszczyński, „Schemat MRS dla równania anormalnej dyfuzji z pochodną niecałkowitego rzędu po czasie”, *Prace Naukowe Instytutu Matematyki i Informatyki Politechniki Częstochowskiej*, tom 1, nr 1, ss. 39–46, 2002.
144. C. E. Baukal, *Industrial Combustion Pollution and Control*, New York: Marcel Dekker, 2004.
145. Prawo ochrony środowiska, ustawa z dn. 27 kwietnia 2001 r., Dz. U., nr 62, poz. 627., 2001.
146. V. Wróblewska, „Warunki powstawania i redukcji tlenków azotu w kotłach energetycznych”, *Energetyka*, nr nr 3, ss. 102–106, 1989.
147. T. Wróblewski, Red., *Urządzenia kotłowe*, Warszawa: WNT, 1973.
148. S. Bastian, *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*, Warszawa: Arkady, 1980.
149. M. Chudek, *Węgiel brunatny – utylizacja surowców towarzyszących i odpadów elektrownianych*, Gliwice: 1999, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

150. K. Savolainen, E. Heinolainen, P. Dernjatin, „Metody pierwotne redukcji NO_x w kotłach energetycznych. Zaawansowane technologie spalania pozwalające zredukować emisję NO_x poniżej 200mg/Nm³ metodami pierwotnymi”, TECH-EXPO, ss. 45–52, 2009.
151. S. R. Turns, An introduction to combustion, concepts and applications, Singapore: McGraw-Hill, 1996.
152. M. Taniguchi, K. Yamamoto, H. Kobayashi, „A reduced NO_x reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions”, Fuel, tom 81, nr 3, ss. 363–371, February 2002.
153. H. Kruczek, „Przydatność pomiaru warstwy przyściennej do oceny stopnia zagrożenia korozją wysokotemperaturową (niskotlenową)”, Energetyka, nr 6, ss. 419–427, 2002.
154. T. Heinzl, V. Siegle, H. Spliethoff, K. H. G. Hein, „Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility”, Fuel Processing Technology, tom 54, nr 1–3, ss. 109–125, 1998.
155. M. Pronobis, „The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency”, Fuel, tom 85, nr 4, ss. 474–480, 2006.
156. M. Liszka, H. Majchrzak, „Analiza efektów ekologicznych na proces współspalania węgla i biomasy na przykładzie Elektrowni Opole”, Energetyka, nr 3, ss. 133–140, 2003.
157. W. Wójcik, A. Kotyra, P. Komada, „Biomass combustion monitoring using fibre-optic probe”, w IV International Conference "New Electrical and Electronic Technologies and Their Application, Zakopane, 2005.
158. W. Wójcik, A. Kotyra, T. Golec, „Combustion assesment of coal and biomass mixtures using image processing”, w Symposium on Photonics Technologies for Framework Programme 7 OPERA, Wrocław, 2006.
159. J. Ballester, A. Sanz, R. Hernandez, A. Smolarz, „Diagnostic and control of lean premixed combustion with alternative fuels”, w 13th International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria, 2006.
160. A. Smolarz, W. Wójcik, J. Ballester, R. Hernandez, A. Sanz, T. Golec, „Fuzzy controller for a lean premixed burner”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/2010, ss. 287–289, 2010.
161. N. Docquier, S. Candel, „Combustion control and sensors: a review”, Progress in Energy and Combustion Science, nr 28, ss. 107–150, 2002.
162. A. Cessou, U. Meier, D. Stepowski, „Applications of planar laser induced fluorescence in turbulent reacting flows”, Measurement Science and Technology, nr 11, ss. 887–901, 2000.

163. A. Hendricks, U. Vandsburger, W. R. Saunders, W. Baumann, „The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for the measurements of flame dynamics”, *Measurement Science and Technology*, nr 17, ss. 139–144, 2006.
164. R. M. Mihalcea, D. S. Baer, R. K. Hanson, „Advanced diode laser absorption sensor for in-situ combustion measurements of CO₂, H₂O and gas temperature”, *Proc Combust Inst*, nr 27, ss. 95–101, 1998.
165. A. Gaydon, *The spectroscopy of flames*. 2nd ed., London: Chapman & Hall, 1974.
166. L. Arias, S. Torres, D. Sbarbaro, O. Farias, „Photodiode-based sensor for flame sensing and combustion-process monitoring”, *Applied Optics*, nr 47(29), ss. 5541–9, 2008.
167. C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, A. M. Taylor, „Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* y CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames”, *Combustion and Flame*, nr 156(2), ss. 273–291, 2009.
168. J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Basic aspects of OH(A), CH(A) and C₂(d) chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames”, *Combustion and Flame*, nr 140(1–2), ss. 34–45, 2005.
169. K. Devriendt, H. Van Look, B. Ceursters, J. Peeters, „Kinetics formation of chemiluminescent CH by the elementary reactions of C₂H with O and O₂: a pulse laser photolysis study”, *Chemical Physics Letters*, nr 261, ss. 452–6, 1996.
170. G. P. Smith, J. Luque, C. Park, J. B. Jeffries, D. R. Crosley, „Low-pressure flame determinations of rate constants for OH(A) and CH(A) chemiluminescence”, *Combustion and Flame*, nr 131, ss. 59–69, 2002.
171. J. Luque, J. B. Jeffries, G. P. Smith, D. R. Crosley, K. T. Walsh, M. B. Long, „CH (A-X) and OH (A-X) optical emission in an axisymmetric laminar diffusion flame”, *Combustion and Flame*, tom 122, nr 1–2, ss. 172–5, 2000.
172. A. Leipertz, R. Obertacke, F. Wintrich, „Industrial combustion control using UV emission tomography”, *Proceedings of the Combustion Institute*, nr 26, ss. 2869–2875, 1996.
173. G. P. Smith, C. Park, J. Luque, „A note on chemiluminescence in low-pressure hydrogen and methane-nitrous oxide flames”, *Combustion and Flame*, tom 140, nr 4, ss. 385–389, 2005.
174. M. Tamura, P. A. Berg, J. E. Harrington, J. Luque, J. B. Jeffries, G. P. Smith, „Collisional quenching of CH(A), OH(A) and NO(A) in low pressure hydrocarbon flames”, *Combustion and Flame*, tom 114, nr 3–4, ss. 502–14, 1998.

175. T. Croonenbroek, „Diagnostics optiques applique's aux milieux reactifs (diffusion Rayleigh, fluorescence induite par laser, absorption, analyse de la chimiluminescence). Application aux flammes laminaires etirees a contre-courant. PhD thesis”, Paris VI, 1996.
176. R. W. Pearse, The identification of molecular spectra. 3rd ed., London: Chapman & Hall, 1965.
177. D. S. Dandy, S. R. Vosen, „Numerical and experimental studies of hydroxyl radical chemiluminescence in methane-air flames”, *Combust Sci Technol*, nr 82, ss. 131–50, 1992.
178. J.-M. Samaniego, F. N. Egolfopoulos, T. C. Bowman, „Samaniego J-M, Egolfopoulos FN, Bowman CT. CO* chemiluminescence in premixed flames”, *Combustion Science and Technology*, tom 109, ss. 183–203, 1995.
179. K. T. Walsh, M. B. Long, M. A. Tanoff, M. D. Smooke, „Experimental and computational study of CH, CH*, and OH* in an axisymmetric laminar diffusion flame”, *Proceedings of Combustion Institute*, nr 27, ss. 615–623, 1998.
180. K. J. Krost, J. A. Hodgeson, R. K. Stevens, „Flame chemiluminescence detection of nitrogen compounds”, *Analytical Chemistry*, nr 45 (11), ss. 1800–1804, 1973.
181. N. Docquier, Belhafaoui, L. F. S, N. Darabiha, J.-C. Rolon, „Experimental and numerical study of chemiluminescence in methane/air high pressure flames for active control applications”, *Proceedings of Combustion Institute*, nr 28, ss. 1765–1774, 2000.
182. V. Nori, J. Seitzman, „CH* chemiluminescence modeling for combustion diagnostics”, *Proceedings of the Combustion Institute*, tom 32, nr 1, ss. 895–903, 2009.
183. O. Farias Fuentes, „Towards the development of an optimal combustion control in fuel-oil boilers from the flame emission spectrum. PhD Thesis”, *Universite de Liege, Belgium, Liege*, 1997.
184. S. Iida, K. Hosome, K. Kimura, K. Tomatsu, T. Tachibana, „Study of an optical frequency type combustion control”, *Toyota Tech Rev*, tom 41, nr 2, ss. 42–50, 1992.
185. W. Von Drasek, O. Charon, O. Marsais, „Industrial combustion monitoring using optical sensors”, w *Industrial and Environmental Monitors and Biosensors*, Boston, MA, November 1998.
186. B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, J.-C. Rolon, N. Darabiha, S. Candel, „OH chemiluminescence as an active control parameter for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames”, *Fuel*, tom 80, nr 1, ss. 67–74, 2001.

187. J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Measurement of the local flame-front structure of turbulent premixed flames by local chemiluminescence”, *Proc Combust Inst*, nr 28, ss. 343–50, 2000.
188. N. Kawahara, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Measurements of the combustion characteristics of compound clusters in pressure-atomized spray flame”, w *AIAA 37th Aerospace Sciences Meeting*, Paper 99–0210, Reno, NV, January 1999.
189. T. Chou, J. Patterson, „In-cylinder measurement of mixture maldistribution in a 1-head engine”, *Combust Flame*, nr 101, ss. 45–57, 1995.
190. M. Barrere, S. Barrere, „Etude spectrographique d'une flamme stabilisee dans un ecoulement”, *La Recherche Aeronautique*, nr 67, ss. 11–19, 1958.
191. C. Hantschk, J. Hermann, D. Vortmeyer, „Active instability control with direct-drive servo valves in liquid-fueled combustion systems”, *Proc Combust Inst*, nr 26, ss. 2835–2841, 1996.
192. J. Hermann, S. Gleis, D. Vortmeyer, „Active instability control (aic) of spray combustors by modulation of the liquid fuel flow rate”, *Combust Sci Technol*, nr 118, ss. 1–25, 1996.
193. R. Blonbou, A. Laverdant, S. Zaleski, P. Kuentzmann, „Active control of combustion instabilities on a Rijke tube using a neural network”, *Proceedings of Combustion Institute*, nr 28, ss. 747–755, 2000.
194. K. C. Schadow, E. Gutmark, K. J. Wilson, „Active combustion control in coaxial dump combustor”, *Combustion Science Technology*, nr 81, ss. 285–300, 1992.
195. G. A. Richards, M. C. Janus, „Characterization of oscillations during premix gas turbine combustion”, *J Engng Gas Turb Power*, nr 120, ss. 294–302, 1998.
196. K. R. McManus, T. Poinso, S. M. Candel, „A review of active control of combustion instabilities”, *Prog Energy Combust Sci*, nr 19, ss. 1–29, 1993.
197. K. Kim, J. Lee, J. Stenzler, D. A. Santavicca, „Optimization of active control systems for suppressing combustion dynamics”, w *NATO RTO Meeting on Active Control Technology*, Braunschweig, Germany, 2000.
198. J. G. Lee, B.-S. Hong, K. Kim, V. Yang, D. Santavicca, „Optimization of active control systems for suppressing combustion instability”, w *NATO AVT Meeting on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels*, Lisbon, Portugal, 1998.
199. C. O. Paschereit, E. Gutmark, B. Schuermans, „Performance enhancement of gas-turbine combustor by active control of fuel injection and mixing process theory and practice”, w *NATO RTO Meeting on Active Control Technology*, Braunschweig, Germany, 2000.

200. E. Gutmark, T. Parr, D. Hanson-Parr, K. Schadow, „Use of chemiluminescence and neural networks in active combustion control”, w Twenty-Third Symposium on Combustion, 1991.
201. E. Gutmark, T. P. Parr, D. M. Hanson-Parr, K. C. Schadow, „Use of chemiluminescence and neural networks in active combustion control”, Proc Combust Inst, nr 23, ss. 1101–6, 1990.
202. M. Ohtsuka, S. Yoshida, S. I. Inage, N. Kobayashi, „Combustion oscillation analysis of premixed flames at elevated pressures”, w ASME Turbo Expo 1998, Sztokholm, 1998.
203. K. K. Venkataraman, L. H. Preston, D. W. Simons, B. J. Lee, J. G. Lee, D. A. Santavicca, „Mechanism of combustion instability in a lean premixed dump combustor”, J Propu Power, tom 15, nr 6, ss. 909–918, 1999.
204. J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Spatially resolved measurement of OH*, CH* and C2* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames”, Proceedings of the Combustion Institute, tom 28, nr 2, ss. 1757–64, 2000.
205. R. Obertacke, H. Wintrich, F. Wintrich, A. Leipertz, „A new sensor system for industrial combustion monitoring and control using UV emission spectroscopy and tomography”, Combustion Science and Technology, nr 121, ss. 133–151, 1996.
206. H. M. Hertz, G. W. Faris, „Emission tomography of flame radicals”, Opt Lett, tom 10, nr 6, ss. 351–353, 1988.
207. A. Leipertz, R. Obertacke, F. Wintrich, „Industrial combustion control using UV emission tomography”, Proceedings of Combustion Institute, nr 26, ss. 2869–2875, 1996.
208. A. H. Andersen, „Tomography transform and inverse in geometrical optics”, J Opt Soc Am A, tom 4, nr 8, ss. 1385–95, 1987.
209. L. Hesselink, „Digital image processing in flow visualization”, Annu Rev Fluid Mech, nr 20, ss. 421–85, 1988.
210. W. Lauterborn, A. Vogel, „Modern optical techniques in fluid mechanics”, Annu Rev Fluid Mech, nr 16, ss. 223–44, 1984.
211. M. De Leo, A. Saveliev, L. A. Kennedy, S. A. Zelepouga, „OH and CH luminescence in opposed flow methane oxy-flames”, Combustion and Flame, nr 149, ss. 435–447, 2007.
212. Y. K. Jeong, C. H. Jeon, Y. J. Chang, „Evaluation of the equivalence ratio of the reacting mixture using intensity ratio of chemiluminescence in laminar partially premixed CH₄-air flames”, Experimental Thermal and Fluid Science, tom 30, nr 7, ss. 663–673, 2006.

213. M. G. Allen, C. T. Butler, S. A. Johnson, E. Lo, F. Russo, „An imaging neural network combustion control system for utility boiler applications”, *Combustion and Flame*, nr 94, ss. 205–214, 1993.
214. G. Herding, R. Snyder, C. Rolon, S. Candel, „Investigation of cryogenic propellant fames using computerized tomography of OH emission images”, *J Propu Power*, tom 13, nr 2, ss. 146–151, 1998.
215. A. Tripathi, „Structure des fammes cryotechniques a haute pression – PhD thesis”, Ecole Centrale Paris, Cha.tenay-Malary, France, 2001.
216. J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Measuring local OH ' to analyze fame front movement in a turbulent premixed fame, Paper 99–2784”, w 35th AIAA Joint Propulsion Conference, Los Angeles, CA, June 1999.
217. S. Tsushima, H. Saitoh, F. Akamatsu, M. Katsuki, „Observation of combustion characteristics of droplet clusters in a premixed-spray fame by simultaneous monitoring of planar spray images and local chemiluminescence”, *Proc Combust Inst*, nr 27, ss. 1967–1974, 1998.
218. F. Akamatsu, T. Wakabayashi, S. Tsushima, M. Katsuki, Y. Mizutani, Y. Ikeda, N. Kawahara, T. Nakajima, „The development of a light-collecting probe with high spatial resolution applicable to randomly fluctuating combustion fields”, *Measurement Science and Technology*, tom 10, nr 10, ss. 1240–1246., 1999.
219. B. Kim, M. Kaneko, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Detailed spectral analysis of the process of HCCI combustion”, *Proceedings of the Combustion Institute*, nr 29(1), ss. 671–677, 2002.
220. Y. Hardalupas, M. Orain, C. S. Panoutsos, A. M. K. P. Taylor, J. Olofsson, H. Seyfried, „Chemiluminescence sensor for local equivalence ratio of reacting mixtures of fuel and air (FLAMESEEK)”, *Applied Thermal Engineering*, nr 24(11–12), ss. 1619–32, 2004.
221. Y. Ikeda, J. Kojima, T. Nakajima, F. Akamatsu, M. Katsuki, „Measurements of the local flamefront structure of turbulent premixed flames by local chemiluminescence”, *Proceedings of the Combustion Institute*, tom 28, nr 1, ss. 343–350, 2000.
222. Y. Hardalupas, M. Orain, „Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame”, *Combustion and Flame*, tom 139, nr 3, ss. 188–207, 2004.
223. B. Gillet, Y. Hardalupas, C. Kavounides, A. M. K. P. Taylor, „Infrared absorption for measurement of hydrocarbon concentration in fuel/air mixtures (MAST-B- LIQUID)”, *Applied Thermal Engineering*, tom 24, nr 11–12, ss. 1633–1653, 2004.

224. Y. Hardalupas, C. S. Panoutsos, G. Skevis, A. M. K. P. Taylor, „Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed iso-octane/air flames”, w Proceedings of the 2nd European Combustion Meeting, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2005.
225. N. Kawahara, Y. Ikeda, T. Nakajima, „Measurements of the Combustion Characteristics of Compound Clusters in Pressure-Atomized Spray Flame, Paper No. 99-0210”, w 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit: AIAA, Reno, NV, USA, 1999.
226. P. Kauranen, S. Andersson-Engels, S. Svanberg, „Spatial mapping of flame radical emission using a spectroscopic multi-colour imaging system”, Applied Physics B, tom 4, nr 53, ss. 260–264, 1991.
227. J. Brouwer, B. A. Ault, J. E. Bobrow, G. S. Samuelsen, „Active control for gas turbine combustors”, Proceedings of Combustion Institute, nr 23, ss. 1087–1092, 1990.
228. J. M. Cohen, N. M. Rey, C. A. Jacobson, T. J. Anderson, „Active control of combustion instability in a liquid fueled, low-NOx combustor”, w NATO AVT Meeting on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels, , October 1998, ss. 38–1–9., Lisbon, Portugal, 1998 (October).
229. E. Gutmark, T. P. Parr, D. M. Hanson-Parr, K. C. Schadow, „Closed-loop amplitude modulation control of reacting premixed turbulent jet”, AIAA J, tom 29, nr 12, ss. 2155–62, 1991.
230. M. M. Miyasato, V. G. McDonell, S. Samuelsen, „Active optimization of the performance of a gas turbine combustor”, w NATO RTO Meeting on Active Control Technology,, Braunschweig, Germany, 2000 (May).
231. M. Wendeker, D. Piernikarski, „Experimental stand for optical fiber combustion sensing in a spark ignition automotive engine”, Proceedings of SPIE, tom 3189, ss. 90–99, 1997.
232. D. M. Brown, G. E. Company, „Combustion control apparatus and method”. 95/42 Patent European Patent Application No. 0.677.706 A1, 1995.
233. B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, S. Candel, „An experimental study of the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane/air flames”, Fuel, tom 80, nr 11, ss. 1583–1591, 2001.
234. B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, J.-C. Rolon, N. Darabiha, S. Candel, „Systematic measurements of OH chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames”, Fuel, tom 80, nr 1, ss. 67–74, 2001.

235. J. Ballester, R. Hernandez, A. Sanz, A. Smolarz, J. Barroso, A. Pina, „Chemiluminescence monitoring in premixed flames of natural gas and its blends with hydrogen”, *Proceedings of the Combustion Institute*, nr 32, ss. 2983–2991, 2009.
236. N. Docquier, F. Lacas, S. Candel, „Closed-loop equivalence ratio control of premixed combustors using spectrally resolved chemiluminescence measurements”, *Proceedings of the Combustion Institute*, tom 29, nr 1, ss. 139–145, 2002.
237. R. W. Schefer, W. D. Kulatilaka, B. D. Patterson, „Visible emission of hydrogen flames”, *Combustion and Flame*, nr 156(6), ss. 1237–1241, 2009.
238. V. Nori, J. Seitzman, „Chemiluminescence Measurements and Modeling in Syngas, Methane and Jet-A Fueled Combustors”, w *AIAA-2007-0466 at the 45th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, Jan 8-11, 2007.
239. V. N. Nori, J. M. Seitzman, „CH* chemiluminescence modeling for combustion diagnostics”, *Proceedings of the Combustion Institute*, nr 32(1), ss. 895–903, 2009.
240. T. S. Cheng, C. Y. Wu, Y. H. Li, Y. C. Chao, „Chemiluminescence measurements of local equivalence ratio in a partially premixed flame”, *Combustion Science and Technology*, nr 178, ss. 1821–1841, 2006.
241. V. Nori, J. Seitzman, „Evaluation of Chemiluminescence as a Combustion Diagnostic under Varying Operating Conditions”, w *AIAA-2008-0953 at the 46th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, Jan. 7-10, 2008.
242. T. M. Muruganandam, B. H. Kim, R. Olsen, M. Patel, B. Roming, J. M. Seitzman, „Chemiluminescence based sensors for turbine engines, Paper No. 2003–4490”, w *39th AIIA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsville, AL, USA, 2003.
243. T. M. Muruganandam, B. H. Kim, M. R. Morrell, V. N. Nori, M. Patel, B. W. Roming, J. M. Seitzman, „Optical equivalence ratio sensors for gas turbine combustors”, *Proceedings of the Combustion Institute*, tom 30, nr 1, ss. 1601–1609, 2005.
244. L. Zimmer, S. Tachibana, T. Yamamoto, Y. Kurosawa, K. Suzuki, „Evaluation of chemiluminescence as sensor for lean premixed combustion”, w *4th Symposium on Smart Control of Turbulence*, Tokio, Japonia, 2003.
245. J. Ballester, A. Sanz, R. Hernandez, A. Smolarz, „Detection and analysis of emitted radiation for advanced monitoring and control of combustors”, *Proc. SPIE 5948, Photonics Applications in Industry and Research IV*, nr 5948, ss. 59482H, 2005.

246. T. Chou, D. J. Patterson, „In-cylinder measurement of mixture maldistribution in a L-head engine”, *Combustion and Flame*, tom 101, nr 1–2, ss. 45–57, 1995.
247. T. García-Armingol, J. Ballester, A. Smolarz, „Chemiluminescence-based sensing of flame stoichiometry: Influence of the measurement method”, *Measurement*, tom 46, nr 9, ss. 3084–3097, 2013.
248. C. D. Hurley, R. W. Copplestone, C. W. Wilson, „Optical measurements of turbulence and residence time in a gas turbine combustor.”, w 35th AIAA Joint Propulsion Conference, Paper 99–2641, Los Angeles, CA, June 1999, Los Angeles, 1999.
249. P. Menna, A. D'Alessio, „Light scattering and extinction coefficients for soot forming flames in the wavelength range from 200 nm to 600 nm”, *Proc Combust Inst*, nr 19, ss. 1421–1428, 1982.
250. U. O. Koylu, G. M. Faeth, „Spectral extinction coefficients of soot aggregates from turbulent diffusion flames”, *J Heat Transfer*, nr 118, ss. 415–421, 1996.
251. U. O. Koylu, „Quantitative analysis of in-situ optical diagnostics for inferring particle/aggregate parameters in flames: implications for soot surface growth and total emissivity”, *Combustion and Flame*, tom 109, nr 3, ss. 488–500, 1997.
252. S. C. Lee, C. L. Tien, „Optical constants of soot in hydrocarbon flames”, *Proc Combust Inst*, nr 18, ss. 1159–66, 1981.
253. R. G. Siddall, I. A. McGrath, „The emissivity of luminous flames”, *Proc Combust Inst*, nr 9, ss. 102–10, 1962.
254. W. H. Dalzell, A. F. Sarofim, „Optical constants of soot and their application to heat flux calculations”, *J Heat Transfer*, nr 91, ss. 100–104, 1969.
255. D. P. Correia, P. Ferrao, A. Caldeira-Pires, „Flame 3D tomography sensor for in-furnace diagnostics”, *Proc Combust Inst*, nr 28, ss. 431–438, 2000.
256. M. Y. Choi, A. Hamins, G. W. Mulholland, T. Kashiwagi, „Simultaneous optical measurement of soot volume fraction and temperature in premixed flames”, *Combust Flame*, nr 99(1), ss. 174–186, 1994.
257. G. Lu, Y. Yan, S. Cornwell, G. Riley, „Temperature Profiling of Pulverised Coal Flames Using Multi-Colour Pyrometric and Digital Imaging Techniques”, w IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, 2005.
258. Z. Jiang, Z. Luo, H. Zhou, „A simple measurement method of temperature and emissivity of coal-fired flames from visible radiation image and its application In CFB boiler furnace”, *Fuel*, nr 88, ss. 980–987, 2009.

259. N. Docquier, F. Lacas, S. Candel, „Operating point control of gas turbine combustor (Paper 2001-0485)”, w AIAA 39th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, 2001.
260. L. Brenez, J. P. Martin, A. Soufiani, J. C. Rolon, „Optical and spectroscopic diagnostics for the study of laminar partially premixed injectors and natural gas boilers”, w Second European Conference on small Burner and Heating Technology, tom 2, ss. 381–390., Stuttgart, Germany, March 2000.
261. P. R. Solomon, P. E. Best, M. Carangelo, J. R. Markham, P.-L. Chien, „FT-IR emission/transmission spectroscopy for in situ combustion diagnostics”, Proc Combust Inst, nr 21, ss. 1763–1771, 1986.
262. J. Heland, K. Schafer, „Analysis of aircraft exhausts with Fourier-transform infrared emission spectroscopy”, Appl Opt, nr 36(21), ss. 4922–4931, 1997.
263. M. Hilton, A. H. Lettington, C. W. Wilson, „Gas turbine exhaust emissions monitoring using nonintrusive infrared spectroscopy”, J Engng Gas Turb Power, nr 120, ss. 514–522, 1998.
264. T. E. Parker, M. F. Miller, K. R. McManus, M. G. Allen, W. T. Rawlins, „Infrared emission from high-temperature H₂O(v₂): a diagnostic for concentration and temperature”, AIAA J, tom 34, nr 3, ss. 500–507, 1996.
265. J. Vally, Etude du spectre d'emission infrarouge des gaz de combustion: application a la mesure de temperature de gaz et de concentration de CO₂. PhD thesis, Paris , France: Universite Paris X, 1999.
266. D. P. Dewitt, G. D. Nutter, Theory and practice of radiation thermometry, John Wiley and Sons Inc., 1988.
267. J. Koronacki, J. Ćwik, Statystyczne systemy uczące się, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005.
268. I. T. Jolliffe, Principal Component Analysis, Second ed. red., New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
269. W. J. Krzanowski, Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective, London, 2000.
270. R. Duda, P. Hart, D. Stork, Pattern Classification, 2 red., New York: J.Wiley & Sons, 2000.
271. G. J. McLachlan, Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition, New York: Wiley, 2004.
272. A. Webb, Statistical Pattern Recognition, New York: J.Wiley & Sons, 2005.

273. W. Duch, J. Korbicz, L. Rutkowski, R. Tadeusiewicz, (Red.), „Statyczne i dynamiczne sieci GMDH”, w Sieci Neuronowe. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, t.6, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2000, ss. 227–256.
274. J. Korbicz, „Sztuczne sieci neuronowe i ich zastosowanie w elektrotechnice i energetyce”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9, ss. 194–200, 2009.
275. A. G. Ivakhnenko, „Polynomial theory of complex systems”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, nr 4, ss. 44–58, 1971.
276. D. T. Pham, L. Xing, Neural Networks for Identification, Prediction and Control, London: Springer-Verlag, 1995.
277. M. Norgaard, O. Ravn, N. K. Poulsen, L. K. Hansen, Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems, London: Springer-Verlag, 2000.
278. S. Osowski, Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym, Warszawa: WNT, 1996.
279. S. Osowski, Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
280. G. Cybenko, „Approximation of superpositions of a sigmoidal function”, Mathematics of Control, Signals and Systems, nr 2(4), ss. 303–314, 1989.
281. A. R. Barron, „Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoid function”, IEEE Transactions on Information Theory, nr 39, ss. 930–945, 1993.
282. W. Wójcik, M. Kalita, A. Smolarz, „The influence of evolutionary niche occurrence on genetic controller operation in the power boiler”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, ss. 222–224, 2008.
283. W. Wójcik, M. Kalita, A. Smolarz, „The influence of selection type choice on genetic controller operation in the power boiler”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, ss. 225–227, 2008.
284. W. Wójcik, T. Golec, M. Kalita, „Zastosowanie algorytmów genetycznych do analizy pomiarów ze światłowodowego systemu monitorowania płomienia”, w Materiały IX Konferencji Światłowodowy i Ich Zastosowania, Krasnobród, 2003.
285. W. Wójcik, M. Kalita, T. Golec, A. Smolarz, „Zastosowanie algorytmów koewolucyjnych do modelowania wybranych parametrów palnika energetycznego”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/2010, ss. 244–246, 2010.
286. M. M. Gupta, L. Jin, N. Homma, Static and Dynamic Neural Networks, Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

287. T. Kohonen, „Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps”, *Biological Cybernetics*, nr 43, ss. 59–69, 1982.
288. E. Czogała, J. Łęski, *Fuzzy and neuro-fuzzy intelligent systems*, New York: Physica-Verlag HD, 2000.
289. D. DuBois, H. M. Prade, *Fuzzy Sets and Systems*, New York: Academic Press, 1988.
290. L. A. Zadeh, „Fuzzy Sets”, *Information and Control*, nr 8, ss. 338–353, 1965.
291. L. Bolc, W. Borodziejewicz, M. Wójcik, *Podstawy przetwarzania informacji niepewnej i niepełnej*, Warszawa: PWN, 1991 .
292. E. Czogała, W. Pedrycz, *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*, Warszawa: PWN, 1985.
293. J. Kacprzyk, *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*, Warszawa: PWN, 1986.
294. A. Łachwa, *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001.
295. A. Piegat, *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza "Exit", 1999.
296. D. Rutkowska, M. Piliński, L. Rutkowski, *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Warszawa – Łódź: PWN, 1997.
297. L. Rutkowski, *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wydanie drugie red., Warszawa: PWN, 2009.
298. R. Seising, *Views on Fuzzy Sets and Systems from Different Perspectives: Philosophy and Logic, Criticisms and Applications (1st ed.)*, Springer Publishing Company, Incorporated, 2009.
299. L. X. Wang, J. M. Mendel, „Generating fuzzy rules by learning from examples”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, tom 22, nr 6, ss. 1414–1427, 1992.
300. T. Takag, M. Sugeno, „Fuzzy identyfication of system and its application to modeling and control”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Tomy %1 z %2SMC-15, nr 1, ss. 116–132, 1985.
301. M. Sugeno, G. T. Kang, „Structure identification of fuzzy model”, *Fuzzy Sets and Systems*, tom 28, nr 1, ss. 15–33, 1988.
302. T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, Chichester: John Wiley & Sons, 2009 .
303. S. Wierżchoń, *Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania*, Warszawa: AOW Exit, 2001.

304. L. N. De Castro, J. I. Timmis, „Artificial Immune Systems as a Novel Soft Computing Paradigm", t.7, Soft Computing Journal, ss. 526–544, 2003.
305. D. J. Smith, S. Forrest, R. R. Hightower, A. S. Perelson, „Deriving shape-space parameters from immunological data for a model of cross-reactive memory", Journal of Theoretical Biology, tom 189, ss. 141–150, 1997.
306. S. A. Hofmeyr, An Interpretative Introduction to the Immune System, Design Principles for the Immune System and other Distributed Autonomous Systems, I. Cohen, L. Segel, Redaktorzy, Oxford University Press, 2000.
307. M. Greener, „MAbs Turn 30", The Scientist, 14 luty 2005.
308. S. Forrest, „Self-Nonself Discrimination in a Computer", w Proc. of the 1994 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, Los Almitos, CA:IEEE Computer Society Press, Los Almitos, CA, USA, 1994.
309. V.I.Lytvynenko, „Immune classifier for solving binary classification – Theoretical Aspects (in Russian)", System technologies, nr 1(42), ss. 32–47, 2006.
310. V. I. Lytvynenko, „Immune classifier for binary classification tasks – practical implementation (in Russian)", System technologies, nr 5 (46), ss. 113–126, 2006.
311. V. I. Lytvynenko, „Comparative experimental study of a modified negative selection algorithm and clonal selection algorithm negative for solving classification (in Russian)", Vestnik Kherson National Technical University, nr 4(33), ss. 7–14, 2008.
312. D. Dasgupta, „Advances in Artificial Immune Systems", IEEE Computational Intelligence Magazine, ss. 40–49, 2006.
313. S. Forrest, „Computation and the Immune System", SIGBIO Newsletter, Association for Computing Machinery, tom 12, nr 2, ss. 52–57, 1992.
314. P. Hajela, „Constrained Genetic Search via Schema Adaptation: An Immune Network Solution", Structural Optimisation, tom 12, nr 1, ss. 11–15, 1996.
315. V. I. Lytvynenko, „Software realization the modified negative and clonal selection for solving the problem of classification", w Intelligent Decision Support Systems and Computational Intelligence problems (International Conference), 17–21 May 2010, Evpatoria, 2010.
316. FIREYE, Description and installation for infrared photocell scanners SC103, Derry: FIREYE, 2012.
317. DURAG GmbH, Compact Flame Scanner D-LX 700, Hamburg: DURAG GmbH, 2012.

318. C. Romero, X. Li, S. Keyvan, R. Rossow, „Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control”, *Applied Thermal Engineering*, tom 25, nr 5–6, ss. 659–676, 2005.
319. S. Keyvan, R. A. Rossow, M. Velez, W. L. Headrick, R. E. Moore, C. Romero, „Combustion control experimentations at a pilot scale glass furnace”, w 105th Annual Meeting of The American Ceramic Society, Nashville, TN, USA, 2003.
320. A. Sanz, J. Ballester, R. Hernandez, „Advanced monitoring and control of burners using flame sensors”, w 7th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 2006.
321. D. A. Scott, G. B. King, N. M. Laurendeau, „Digital control of equivalence ratio using chemiluminescence feedback for a continuous combustor”, *Combustion Science and Technology*, tom 159, nr 1, ss. 129–146, 2000.
322. D. A. Scott, G. B. King, N. M. Laurendeau, „Chemiluminescence-based feedback control of equivalence ratio for a continuous combustor”, *Journal of Propulsion and Power*, tom 18, nr 2, ss. 376–382, 2002.
323. J. Arthkamp, D. Altemark, H. J. Kruczek, „Burner control using flame signals”, w Preprints of the 1995 International Gas Research Conferences, Cannes, France, 1995.
324. M. M. Miyasato, V. G. McDonnell, G. S. Samuelsen, „Active optimization of the performance of a gas-turbine combustor”, *Combustion Science and Technology*, tom 177, nr 9, ss. 1725–45, 2005.
325. S. J. Wilcox, J. Ward, C. K. Tan, O. H. Tan, R. Payne, „The application of neural networks in a range of combustion systems”, w 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB), Estoril, Lisbon, Portugal, 2002.
326. W. Wójcik, „Application of fibre-optic flame monitoring systems to diagnostics of combustion process in power boilers”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, tom 56, nr 2, ss. 177–195, 2008.
327. W. Wojcik, T. Golec, A. Kotyra, A. Smolarz, P. Komada, M. Kalita, „Optoelectronic controller for pulverized coal burner”, w *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavsko, Ukraina, 2004.
328. J. A. Broadbent, „Fundamental flame flicker monitoring for power plant boilers”, w *IEEE Seminar for Advanced Sensors and Instrumentation Systems for Combustion Processes*, Birmingham, UK, 2000.
329. M. Khesin, R. Girvan, D. Quenan, „Demonstration tests of new burner diagnostic system on a 650 MW coal-fired utility boiler”, w 58th Annual Meeting of the American Power Conference, Chicago, IL, USA, 1996.

330. T. A. Fuller, T. J. Flynn, R. T. Bailey, C. S. Daw, E. A. Finney, K. Kersting, R. Fields, „Field experience with the Flame Doctor System, Paper No. BR-1739”, w EPRI- DOEPA-WMA Combined Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium, Washington DC, USA, 2003.
331. R. Bruschi, E. Giacomazzi, E. Giulietti, C. Stringola, M. Nobili, T. Pagliaroli, S. Giammartini, „An optical technique for the identification and tracking of combustion instabilities”, w Seventh Mediterranean Combustion Symposium, Sardinia, Italy, 2011.
332. H. N. Najm, P. H. Paul, C. J. Mueller, P. S. Wyckoff, „On the adequacy of certain experimental observables as measurements of flame burning rate”, *Combustion and Flame*, tom 113, nr 3, ss. 312–332, 1998.
333. S. M. Candel, T. J. Poinso, „Interactions between acoustics and combustion”, *Proceedings of the Institute of Acoustics*, tom 10, nr 103–153, 1988.
334. F. E. C. Culick, „Combustion instabilities in liquid-fuelled propulsion systems – an overview”, Technical Report AGARD-CP-450, AGARD, 1988.
335. A. P. Dowling, „The calculation of thermoacoustic oscillations”, *Journal of Sound and Vibration*, nr 180(4), ss. 557–581, 1995.
336. J. W. S. Rayleigh, „The explanation of certain acoustical phenomena”, *Nature*, nr 18 July, ss. 319–321, 1878.
337. B. T. Chu, „On the energy transfer to small disturbances in fluid flow (part I)”, *Acta Mechanica*, ss. 215–234, 1965.
338. R. J. Roby, A. J. Hamer, E. L. Johnsson, S. A. Tilstra, T. J. Burt, „Improved method for flame detection in combustion turbines”, *J Engng Gas Turb Power*, nr 117, ss. 332–340, 1995.
339. T. M. Muruganandam, S. Nair, R. Olsen, Y. Neumeier, A. Meyers, J. Jagoda, T. Lieuwen, J. Seitzman, B. Zinn, „Blowout control in turbine engine combustors, Paper No. 2004-0637”, w 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit: AIAA, 2004.
340. T. M. Muruganandam, S. Nair, D. Scarborough, Y. Neumeier, J. Jagoda, T. Lieuwen, J. Seitzman, B. Zinn, „Active control of lean blowout for turbine engine combustors”, *Journal of Propulsion and Power*, nr 21(5), ss. 807–814, 2005.
341. W. Wojcik, A. Smolarz, J. Ballester, A. Kotyra, M. Kalita, A. Sanz, R. Hernandez, „Neural methods of interpretation of data obtained from optical sensor for flame monitoring”, *Proceedings of SPIE*, tom 5952, ss. 5952–59521L, 2005.

342. A. Smolarz, W. Wójcik, A. Kotyra, J. Ballester, K. Jagiełło, „Pomiar wybranych parametrów spalania biogazu”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 56 (6/2010), ss. 555–558, 2010.
343. W. Wójcik, M. Kalita, A. Smolarz, „Fiber-optic system for combustion process monitoring”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 11, ss. 24–28, 2007.
344. W. Wójcik, A. Kotyra, P. Popiel, „Wykorzystanie spektrofotometru światłowodowego do pomiaru widm emisyjnych płomienia”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7, ss. 264–266, 2010.
345. M. el-Hamdi, M. Gorman, K. A. Robbins, „Deterministic chaos in laminar premixed flames: Experimental classification of chaotic dynamics”, *Combustion Science and Technology*, nr 94, ss. 87–101, 1993.
346. N. Chigier, *Energy, combustion, and environment*, McGraw-Hill Publishing Company, 1981.
347. W. Wójcik, „Światłowodowy układ do monitorowania procesu spalania”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, tom 53, nr 11, ss. 24–28, 2007.
348. W. Wójcik, A. Smolarz, A. Kotyra, P. Komada, „Optimization of optical fiber probe for flame monitoring by application of finite element method”, *Proceedings of SPIE*, tom 4239, ss. 133–139, 2000.
349. A. Smolarz, A. Kotyra, W. Wójcik, J. Ballester, „Advanced diagnostics of industrial pulverized coal burner using optical methods and artificial intelligence”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, nr 43, ss. 82–89, 2012.
350. W. Wójcik, A. Kotyra, „Strefowa diagnostyka procesu spalania”, w *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Kontrola, Sterowanie i Automatyzacja Procesu Spalania w Kotłach Energetycznych*, Zakopane, 2005.
351. W. Wójcik, A. Kotyra, A. Smolarz, C. Wojciechowski, „Optymalizacja sondy światłowodowej do pomiarów parametrów płomienia”, w *Materiały konferencyjne VII Konferencji "Światłowody i ich zastosowania"*, Krasnobród, 1999.
352. W. Wójcik, W. Surtel, A. Smolarz, A. Kotyra, P. Komada, „W. Wójcik, W. Surtel, A. Smolarz, A. Kotyra, P. Komada: Optical fiber system for combustion quality analysis in power boilers”, *Proceedings of SPIE*, nr 4425, ss. 517–522, 2001.
353. A. Kotyra, *Diagnostyka procesu spalania pyłu węglowego z wykorzystaniem metod przetwarzania obrazu*, Lublin: Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, 2010.

- 354. A. Kotyra, „Analiza składowych głównych sygnałów wielokanałowego układu monitorowania płomienia”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, ss. 57–60, 2010.
- 355. J. Łęski, *Systemy neuronowo-rozmyte*, Warszawa: WNT, 2008.
- 356. W. Wójcik, A. Kotyra, P. Komada, T. Ławicki, T. Zyska, K. Mazuś, „SMARTBURN report, WP3: Signal Processing and Data Analysis (RFCR-CT-2008-00009)”, nie publikowany, Lublin , 2009.