

Joachim Kozioł
Piotr Matusiak



**ENERGETYCZNE
I EKOLOGICZNE
EFEKTY SPALANIA
WĘGLA KAMIENNEGO
Z ODPADAMI GUMOWYMI**

Prace Naukowe - Monografie



Gliwice 2010

Joachim KOZIOL

Piotr MATUSIAK

ENERGETYCZNE I EKOLOGICZNE EFEKTY SPALANIA WĘGLA KAMIENNEGO Z ODPADAMI GUMOWYMI

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Joachim Koziół – Politechnika Śląska
dr inż. Piotr Matusiak – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Komitét redakcyjny

prof. dr hab. inż. Adam Klich
prof. dr hab. inż. Zdzisław Kłeczek
prof. dr inż. Włodzimierz Sikora

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Ryszard Wilk – Politechnika Śląska
dr hab. inż. Marian Kieloch – prof. Politechniki Częstochowskiej

Sekretarz redakcji:

mgr inż. Romana Zając

Copyright by

Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice

Praca naukowa finansowana jest ze środków na naukę w latach 2007-2009 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach projektu promotorskiego nr N N513 1204 33.

ISBN 978-83-60708-44-6

Wydawca:

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

Spis treści

	str.
1. Wstęp	1
1.1. Problem zagospodarowania	1
1.2. Współspalanie w instalacjach przemysłowych	2
1.3. Właściwości paliwowe odpadów	3
1.4. Utylizacja zużytych opon	4
1.5. Podsumowanie	5
2. Ogólna charakterystyka pracy	5
2.1. Tezy	5
2.2. Cel i zakres pracy	6
2.3. Dotychczasowe badania. Informacje w literaturze	7
3. Badania właściwości fizykochemicznych	9
3.1. Stanowiska laboratoryjne	9
3.2. Metodyka badań laboratoryjnych	9
3.3. Wyniki badań laboratoryjnych	11
4. Wpływ warunków spalania na efekty analizowanego procesu	14
4.1. Symulacja procesu spalania paliwa w kotle o ruszcie ruchomym za pomocą badań przeprowadzonych w piecu o ruszcie stałym	14
4.2. Opis stanowiska badawczego	15
4.2.1. Wstępne wygrzewanie komory spalania	18
4.3. Plan eksperymentu	20
4.3.1. Parametry określające warunki i efektywność procesu	20
4.3.2. Proponowany plan eksperymentu	21
4.3.3. Funkcja obiektu	23
4.3.4. Charakterystyka planu badań	24
4.4. Strumień doprowadzonego powietrza	25
4.5. Sposób przeprowadzenia badań	29
4.6. Wyniki przeprowadzenia badań	29
4.7. Wyznaczone funkcje obiektu	33
4.8. Rachunek wyrównawczy	38
4.8.1. Skład elementarny paliw	39
4.8.2. Równania bilansowe	40

4.9. Ocena niepewności uzyskanych rezultatów pomiarowych	46
5. Użyteczność procesu współspalania	48
5.1. Ekonomiczne kryterium użyteczności współspalania	49
5.1.1. Ocena kosztów paliwa	49
5.1.2. Ocena kosztów środowiskowych	49
5.2. Określenie ilości zużytego paliwa	50
5.3. Koszt paliwa	50
5.4. Koszt środowiskowy	51
5.5. Kryterium kosztów	54
6. Badania własności reakcyjnych mieszanek węglowo-gumowych	55
6.1. Opis stanowiska badawczego do wyznaczania wskaźnika CRI i CRS	56
6.1.1. Wskaźnik CRI	56
6.1.2. Wskaźnik CSR	57
6.1.3. Stanowisko do wyznaczania wskaźnika CRI	57
6.1.4. Przygotowanie próbek	58
6.1.5. Koksovanie mieszanki	58
6.1.6. Metoda badania	58
6.1.7. Wyznaczenie punktów pomiarowych	59
6.2. Wyniki badań własności reakcyjnych i wytrzymałościowych koksu	59
6.3. Ocena niepewności wyników	62
6.4. Ocena analitycznych postaci CRI i CRS	63
7. Wnioski i uwagi końcowe	64
7.1. Wnioski	64
7.1.1. Stopień substytucji w zastosowaniach technologicznych	64
7.1.2. Wpływ warunków spalania na efekty energetyczne i ekologiczne	64
7.1.3. Optymalne warunki współspalania węgla i odpadów gumowych	66
7.2. Elementy naukowe i uytylitarne	66
Literatura	67

1. Wstęp

Odpady, między innymi zużyte opony z samochodów osobowych i ciężarowych, taśmy przenośnikowe, mogą być wykorzystywane jako paliwo w procesach energetycznych lub w redukcyjnych procesach technologicznych w przemyśle materiałowym i hutnictwie. Jedną z form zagospodarowania tych odpadów jest ich współspalanie z paliwami konwencjonalnymi. Palne produkty, po odpowiednim przygotowaniu, spełniają rolę paliw alternatywnych. Obiekty, w których przebiegają tego typu procesy, dysponują odpowiednim zapleczem technicznym umożliwiającym prowadzenie procesu współspalania w sposób zgodny z wymogami prawa ochrony środowiska. Korzyścią wynikającą ze spalania paliw konwencjonalnych z odpadowymi jest zmniejszenie ich uciążliwości na środowisko naturalne poprzez ograniczenie powierzchni, na których są one składowane oraz ograniczenie degradacji środowiska naturalnego poprzez zmniejszenie wydobywania surowców mineralnych. Warunkiem opłacalności ekonomicznej współspalania jest tani i nieskomplikowany proces rozdrabniania, separacji i technologia podawania odpadów do paleniska.

Wiadomo również, że niektóre odpady, np. gumowe posiadają własności reakcyjne [37] i mogą być wykorzystane do celów technologicznych, np. jako substytut koksu.

Termiczne metody unieszkodliwiania odpadów mają istotne znaczenie w gospodarce odpadami w wielu europejskich krajach [8, 9]. Wymagania procesowe i ekologiczne odnośnie prowadzenia procesu termicznej utylizacji odpadów ujęto w dyrektywie 2000/76/UE.

W Polsce budowa instalacji termicznego przekształcania odpadów jest inwestycją wymagającą wysokich nakładów finansowych oraz wynegocjowania akceptacji społecznej dla tego typu przedsięwzięcia. Stąd zastosowanie metody współspalania odpadów w istniejących instalacjach zakładów przemysłowych wydaje się być słuszną drogą postępowania.

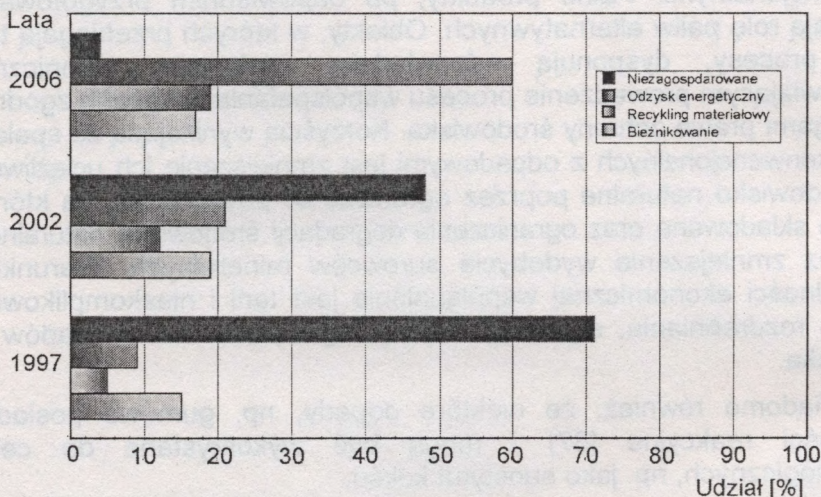
1.1. Problem zagospodarowania

Podstawowym celem gospodarki odpadami jest zmniejszenie ich ilości. W ostatnim okresie czasu podjęto szereg prób [98] rozwiązania problemu zagospodarowania odpadów gumowych na drodze ich degradacji pirolitycznej.

Obowiązująca w krajach Unii Europejskiej dyrektywa 1991/31/EC wymaga redukcji składowanych odpadów odpowiednio o: 25% w 2010 r., 50% w 2013 r., oraz 65% w 2020 r. w stosunku do poziomu z 1995 roku.

Od lipca 2006 roku obowiązuje zakaz składowania opon całych i rozdrobnionych [98].

Szacuje się, że na składowiskach w Polsce zdeponowanych jest około 600 tysięcy ton opon, a rocznie przybywa ich około 270 tysięcy ton (rys. 1.2) [59-60]. Natomiast w Unii Europejskiej rocznie przybywa 3 mln ton zużytych opon [98]. Na rysunku 1.1 przedstawiono możliwości wykorzystania zużytych opon w krajach UE.



Rys.1.1. Możliwości wykorzystania zużytych opon w krajach UE [76]

Sprostanie dyrektywom Unii Europejskiej [8, 9] wymaga nadania szczególnego priorytetu realizacji nowoczesnych linii technologicznych do utylizacji odpadów z opon samochodowych. Zużyte opony ze względu na swoją wielomateriałową konstrukcję sprawiają duże trudności w recyklingu. Realizacja takiego projektu, który nie wymagałby tak dużych nakładów inwestycyjnych, jak w przypadku przetwórstwa odpadów gumowych i ich wtórnego wykorzystania (recykling materiałowy), przyniesie wymierne korzyści gospodarce narodowej i środowisku [46, 105].

1.2. Współspalanie w instalacjach przemysłowych

Obecnie coraz większym zainteresowaniem [76] cieszy się współspalanie odpadów w istniejących paleniskach przemysłowych elektrowni i elektrociepłowni, w których występują procesy wysokotemperaturowe. Związane jest to z wysokimi kosztami budowy spalarni odpadów oraz brakiem społecznej akceptacji dla tego typu inwestycji.

Aglomeracja śląska pod względem możliwości wdrożenia metody współspalania odpadów w instalacjach przemysłowych posiada specyficzne uwarunkowania polegające na rozmieszczeniu na jej terenie

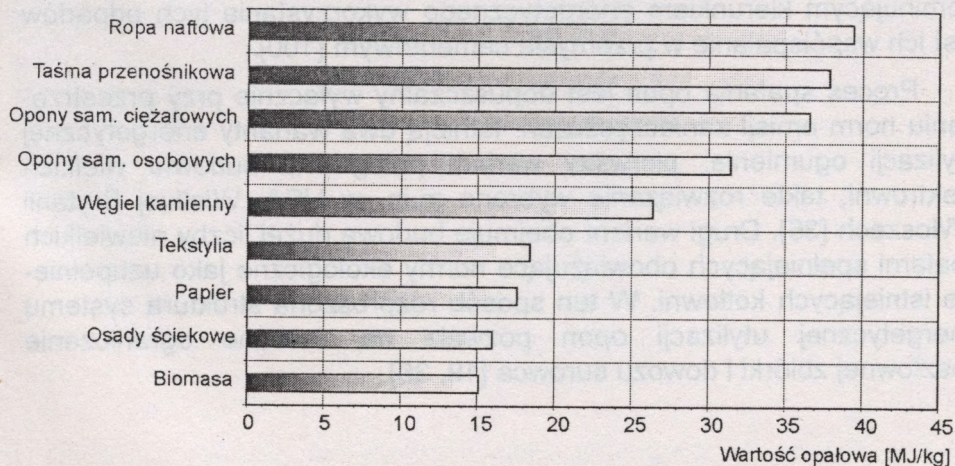
kilkunastu zakładów energetycznych spalających węgiel kamienny. Za zastosowaniem kotłów energetycznych, jako instalacji współspalania odpadów przemawiają względy techniczne – wykorzystanie istniejącej infrastruktury obiektów energetyki zawodowej, jak też uwarunkowania prawne – kotły energetyczne są urządzeniami, które mogłyby potencjalnie najkorzystniej spełniać aktualne przepisy dotyczące standardów emisyjnych i zachowania określonych warunków procesowych [40, 41]. Szansę na dotrzymanie standardów emisyjnych mają przede wszystkim dwa typy instalacji:

- 1) małe kotły o mocy poniżej 100 MW,
- 2) duże nowoczesne kotły pyłowe i fluidalne energetyki zawodowej dysponujące wydajnymi systemami odpylania, odsiarczania i odazotowania spalin [47].

1.3. Właściwości paliwowe odpadów

Ze względu na zastosowanie termicznych metod utylizacji odpadów istotne są właściwości paliwowe odpadów gumowych.

Na rysunku 1.2 przedstawiono orientacyjne wartości opałowe przykładowych paliw, w tym gumy z opon samochodów ciężarowych i osobowych oraz taśmy przenośnikowej. Jak wynika z przedstawionych danych wartość opałowa spalanych opon jest większa niż węgla, może być wykorzystywana w procesach technologicznych, np.: w przemyśle cementowym lub w procesach wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Warunkiem współspalania jest opłacalny ekonomicznie proces rozdrabniania odpadów gumowych z separacją elementów stalowych [19].



Rys. 1.2. Orientacyjne wartości opałowe przykładowych paliw [76]

1.4. Utylizacja zużytych opon

Główną metodą utylizacji zużytych opon jest ich wykorzystanie jako paliwo. Wartość opałowa granulatu gumowego z rozdrobnionych opon wynosi 32-37 MJ/kg, czyli odpowiada wartości opałowej węgla kamiennego wysokiej jakości. Początkowo technologia spalania była związana z recyklingiem gumy; spalano większe frakcje rozdrobnionej gumy, które nie spełniały wymagań innych metod przetwórstwa tego surowca.

Amerykańska firma Waste Management Inc. produkuje urządzenia [36] do rozdrabniania opon. W ciągu jednego roku (1988) w zakładach tej firmy przerobiono 4,5 mln ton opon na gumowe kruszywo przeznaczone do spalania w przemyśle papierniczym i cementowym. Paliwo w tej formie dodaje się w ilości 10% do węgla kamiennego. W Stanach Zjednoczonych przetestowano także spalanie gumy o większym uziarnieniu (do 25 mm) w cyklonowych komorach paleniskowych. W tym przypadku zawartość gumy w węglu wynosiła 2-3%. W Niemczech spalaniu poddaje się 170 tys. ton opon rocznie z łącznej ilości około 400 tys. ton wycofywanych z eksploatacji [36]. Rozwój perspektywicznych technologii energetycznych stymuluje odpowiednia polityka władz, np. rząd Stanów Zjednoczonych za przetworzenie jednej tony ogumienia wypłaca 50 dolarów, a oprócz tego osiągany jest dochód ze sprzedaży przetworzonego surowca jako paliwa dalszym klientom.

Spalanie odpadów gumowych, w tym głównie zużytych opon, w celu wytwarzania ciepła i energii elektrycznej wydaje się być właściwym sposobem ich utylizacji [36, 70], jako że posiadają one bardzo dobre walory energetyczne, przewyższające paliwa kopalne. Odzysk energetyczny zużytych opon samochodowych ciągle wzrasta, przy czym nadal dominującym kierunkiem energetycznego wykorzystania tych odpadów jest ich współspalanie w przemyśle cementowym [100].

Proces spalania opon jest dopuszczalny wyłącznie przy przestrzeganiu norm emisji zanieczyszczeń. Istnieją dwa warianty energetycznej utylizacji ogumienia: pierwszy wariant polega na budowie wielkich elektrowni; takie rozwiązanie wybrano m.in. w USA, Wielkiej Brytanii i Włoszech [36]. Drugi wariant obejmuje budowę dużej liczby niewielkich spalarni spełniających obowiązujące normy ekologiczne jako uzupełnienie istniejących kotłowni. W ten sposób rozproszona struktura systemu energetycznej utylizacji opon pozwala na znaczne ograniczenie kosztownej zbiórki i dowozu surowca [19, 36].

1.5. Podsumowanie

Narastająca ilość zużytych opon samochodowych, jak i odpadów w sektorze komunalnym wymaga zastosowania takich metod ich zagospodarowania, które będą zgodne z wymaganiami UE [19].

Rozwiązaniem problemu zagospodarowania odpadów gumowych mogą stać się termiczne metody ich utylizacji. Do tego celu proponuje się wykorzystanie istniejących instalacji przemysłowych wyposażonych, np.: w kotły energetyczne o odpowiedniej mocy. Obiekty te dysponują zapleczem technicznym umożliwiającym współspalanie w sposób zgodny z wymogami prawa ochrony środowiska.

Proces współspalania prowadzony w tego typu instalacjach wymaga odpowiedniego przygotowania mieszanki zawierającej paliwo podstawowe i rozdrobnione odpady. W przypadku opon samochodowych ich wysoka wartość opałowa, mała zawartość popiołu i wilgoci powinny wyrównać ilość energii zużytej (poniesione koszty) na przetworzenie opon. Dodatkową cenną cechą odpadów gumowych są stwierdzone [22, 76] podczas spalania ich własności redukcyjne.

Zarówno w przypadku odpadów gumowych z opon samochodowych jak i taśm, metoda termicznej utylizacji wymaga badania właściwości palnych i technologicznych tych produktów, jak również opracowania taniego i nieskomplikowanego procesu przygotowania odpadów oraz technologii ich podawania do kotła.

Największą część odpadów gumowych – około 80% masy stanowią zużyte opony samochodowe, około 7% taśmy przenośnikowe i pędne, a pozostałe 13% – inne poeksploatacyjne materiały gumowe.

2. Ogólna charakterystyka pracy

2.1. Tezy

Paliwo alternatywne może być substytutem węgla kamiennego i koksu w ich zastosowaniach technologicznych i energetycznych, przy czym:

- 1) stopień substytucji w zastosowaniach technologicznych zależy od zawartości dodatku paliwa alternatywnego w mieszance,
- 2) istnieją możliwości określenia wpływu warunków spalania węgla kamiennego z paliwem alternatywnym na efekty energetyczne i ekologiczne,
- 3) istnieją określone warunki spalania optymalne ze względu na efektywność współspalania węgla i paliwa alternatywnego (odpadów gumowych).

Warunki spalania przyjęto określać przez następujące parametry eksploatacyjne:

- udział paliwa alternatywnego w mieszance,
- grubość warstwy paliwa na ruszcie,
- czas trwania procesu,
- całkowity strumień powietrza,
- rozkład strumienia dostarczonego powietrza.

2.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest wyznaczanie charakterystyk ekologicznych określających wpływ parametrów eksploatacyjnych na emisję: CO, CO₂, NO_x, SO₂ oraz charakterystyki energetycznej dotyczącej analogicznego wpływu na strumień entalpii spalin i części palne w żużlu.

Cel pracy został osiągnięty w następujących etapach:

- 1) Określenie właściwości fizykochemicznych badanych mieszanek węgla kamiennego i paliwa alternatywnego.
- 2) Określenie wpływu parametrów eksploatacyjnych, a zwłaszcza składu mieszanki paliwowej na: skład uzyskanych spalin oraz efekty energetyczne w badaniach stanowiskowych symulujących pracę komory paleniskowej kotła rusztowego.
- 3) Przeprowadzenie analiz techniczno-ekonomicznych nad wyznaczeniem najkorzystniejszych parametrów eksploatacyjnych.
- 4) Ocena właściwości reakcyjnych mieszanek paliwowych.

Wszystkie wymienione wcześniej etapy zostały zrealizowane dla procesu współspalania węgla kamiennego z odpadami gumowymi z opon samochodów ciężarowych.

W pierwszym etapie pracy (rozdział 3) przedmiotem badań były dodatkowo mieszanki paliwowe węgla z jednym z następujących odpadów gumowych:

- opon samochodów ciężarowych,
- opon samochodów osobowych,
- taśm gumowych z przenośników.

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych właściwości fizykochemicznych oraz składu elementarnego paliwa podstawowego i odpadów wytypowane zostały mieszanki paliwowe, które poddano analizie w dalszych etapach pracy.

W ramach etapu drugiego (rozdział 4) przeprowadzone zostały badania na stanowisku symulującym pracę komory paleniskowej kotła rusztowego, określające wpływ parametrów eksploatacyjnych na skład

uzyskanych spalin: CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz efekty energetyczne: entalpię spalin i zawartość części palnych w żużlu. W celu ograniczenia przeprowadzonych badań symulacyjnych została wykorzystana metoda planowania eksperymentu. W tej części pracy wykorzystano również rachunek wyrównawczy dla poprawy wyników uzyskanych z pomiarów.

W kolejnym etapie rozważań (rozdział 5) przeprowadzonych w pracy opracowano metodę wyznaczania najkorzystniejszych warunków współspalania węgla kamiennego i gumy ze względu na sumaryczny koszt pozyskania paliwa i kosztów środowiskowych. Wielowariantowe obliczenia numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem metody Monte Carlo.

W ostatnim etapie (rozdział 6) podjęta została próba wyznaczania właściwości wpływu dodatku gumowego na redukcję tlenu z surowców technologicznych. Wykorzystano do tego celu badania reaktywności analizowanych mieszanek z dwutlenkiem węgla. W tej części pracy określono ponadto wpływ dodatku gumy na wytrzymałość uzyskanych brykietów koksowo-gumowych.

2.3. Dotychczasowe badania. Informacje w literaturze

Praca stanowi kontynuację, rozszerzenie i modyfikację badań podanych w literaturze. Ocenę możliwości utylizacji odpadów gumowych przedstawiono w pracy V.K. Sharma i innych [67, 68]. Wskazano tam na problemy energetyczne związane z tą utylizacją.

A.Owczarek w swoich pracach zajmował się wpływem substancji mineralnej węgla kamiennych na współspalanie opon samochodowych z miazem węglowym w przemysłowych kotłach rusztowych. Z jego badań przemysłowych [37] wynika, że w przypadku współspalania granulatu węglowego z miazem węglowym straty paliwa są niższe, niż w przypadku samego węgla, ponieważ nastąpiło lepsze wypalenie się paliwa mieszanego. Problem ten nie był analizowany w niniejszej pracy.

W pracy F.Waśniowskiego, H.Goniach, R.Chruściela [4] i innych podano wytyczne dotyczące warunków współspalania węgla z gumą w kotłach rusztowych. Wskazano na możliwość i celowość rozdrobnienia opon do granulacji od 1 do 150 mm z jednoczesnym oddzieleniem elementów metalowych. Zaleca się przy tym ograniczenie maksymalnej ilości dodawanej gumy na 50% w stosunku do całkowitej masy paliwa. Określono równocześnie zakres temperatur spalania paliwa węglowo-gumowego w przedziale od 1200°C do 1500°C.

Z kolei B.Courtemanche i inni [6] badali w warunkach laboratoryjnych wpływ współspalania węgla z paliwami alternatywnymi, między innymi

gumy z opon samochodowych, na emisję substancji szkodliwych. Szczególną uwagę poświęcono tworzeniu termicznych NO_x .

Analogiczne problemy były analizowane przez Li Xiang-guo z zespołem, którzy badali [25] współspalanie węgla z odpadami z opon. W swych badaniach przeprowadzili analizy termogravimetryczne współspalanego węgla z odpadem gumowym w stosunku 10, 30 i 50% udziału masowego gumy. W rezultacie swych badań stwierdzili, że współspalanie granulatu gumowego i niskojakościowych węgli jest możliwe.

A.Atal wraz z Y.A.Levendisem [1] przeprowadzili badania porównawcze charakterystyk spalania sproszkowanych odpadów gumowych i węgla. W swych badaniach stosowali dwa rodzaje gumy i węgla: o granulacji 75–90 μm oraz 180–212 μm . Wyznaczone zostały temperatury płomienia oraz czasy zapłonu i spalania obu granulacji odpadu gumowego, w porównaniu do odpowiednio zmielonego węgla. Z analiz tych wynika jednoznacznie, że ziarenka gumy zapalają się później i krócej się palą, lecz z wyższą temperaturą w porównaniu do ziarenek węgla zmielonego do tych samych rozmiarów.

Natomiast J.A.Contesa z zespołem [5] analizowali kinetykę spalania opon. Badania te przeprowadzili dwuetapowo: w pierwszej części zajmowali się pirolizą opon, a w drugiej spalaniem odpadów gumowych, spalając je w różnej atmosferze tlenu (od 10 do 20%).

Badania procesu spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej [83] przeprowadził A.Szlęk. W swej pracy na zbudowanym stanowisku doświadczalnym przeprowadził badania eksperymentalne, które pozwoliły stwierdzić, że w trakcie współprądowego spalania pojawia się front, który rozprzestrzenia się w kierunku przeciwnym do kierunku powietrza. W drugiej części pracy przeprowadził obliczenia numeryczne symulujące spalanie na ruszcie stałym. Wyzначzył współczynniki czułości wykazując, że prędkość frontu spalania uzależniona jest od procesu przewodzenia ciepła w fazie stałej i zaproponował metodę sterowania kotłem rusztowym opierając się na wcześniejszych wynikach badań eksperymentalnych.

M.Kozioł przeprowadził badania [24] nad współspalaniem węgla kamiennego z osadami ściekowymi. W swojej pracy [24] zaproponował analogiczną metodę do przedstawionej w niniejszej pracy. Różnice między obu pracami polegają na analizowaniu innego rodzaju paliwa alternatywnego, zastosowaniu rotacyjno-ortogonalnego planu badań oraz wykorzystaniu odmiennej metody optymalizacji warunków współspalania.

Liczne badania nad użytecznością energetyczną gumy z opon samochodowych przeprowadzili R.Wasilewski, A.Sobolewski oraz S.Stelmach [97-102,70-75]. Dotyczyły one zwłaszcza pirolizy oraz

współspalania gumy z biomasą. Autorzy niniejszej pracy nie zajmowali się w niej tymi zagadnieniami.

Badania nad wykorzystaniem koksovania jako metody utylizacji odpadów przemysłowych przeprowadził A.Koszorek i A.Mianowski [16].

J.Wandrasz z zespołem przeprowadzał badania nad zastosowaniem substancji palnych [91] i przetwarzaniem odpadów [92-96] w celach energetycznych.

A.Wandrasz przeprowadził badania i ocenę możliwości wykorzystania stałych składników odpadów komunalnych i innych substancji organicznych [89, 90] w procesach formowania paliw.

T.Jaworski zajmował się modelem matematycznym [10,11] procesu spalania warstwy odpadów komunalnych na ruszcie paleniska kotłowego.

Dotychczasowe badania procesu współspalania węgla kamiennego z gumą przeprowadzone były w skali laboratoryjnej w specjalnie w tym celu skonstruowanych i wybudowanych stanowiskach badawczych [20, 33, 76] lub w skali półtechnicznej w kotłach rusztowych [37] lub pyłowych [68]. Dotyczy to również wcześniejszych prac autorów niniejszej pracy [23, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 105].

3. Badania właściwości fizykochemicznych

Przedmiotem badań było określenie następujących właściwości badanych substancji: zawartość popiołu, części lotnych, wilgoci i siarki oraz wyznaczenie wartości opałowej.

3.1. Stanowiska laboratoryjne

Do określenia wilgoci analitycznej oraz zawartości popiołu analitycznego w paliwie posłużył analizator termograwimetryczny LECO TGA-601.

W kalorymetrze automatycznym LECO AC-350 zostało wyznaczone ciepło spalania badanych mieszanin, a następnie obliczono [52] ich wartość opałową.

Do oznaczania zawartości siarki w badanych mieszkankach paliwowych zostało wykorzystane urządzenie LECO SC-132.

3.2. Metodyka badań laboratoryjnych

W pierwszej części pracy przeprowadzono laboratoryjne badania współspalania paliw odpadowych z węglem kamiennym. Celem etapu pracy było określenie własności fizykochemicznych mieszanek powstałych na bazie węgla kamiennego i odpadów w postaci gumy

z opon samochodów osobowych i ciężarowych oraz gumy z taśmy z przenośników.

Prace w swoim zakresie objęły:

- opracowanie metodyki badań,
- przygotowanie mieszanek do przeprowadzenia prób laboratoryjnych,
- wykonanie prób laboratoryjnych określających własności fizykochemiczne mieszanek,
- analizę i opracowanie wyników badań laboratoryjnych.

Charakterystykę materiału użytego do przygotowania mieszanek stanowiących przedmiot badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 3.1. Do przygotowania mieszanek wykorzystano węgiel kamienny, rozdrobnioną gumę z opon samochodów osobowych, rozdrobnioną gumę z opon samochodów ciężarowych oraz gumę z taśmy z przenośników taśmowych.

Przedział od 0 do 15% udziału masowego gumy został wyznaczony na podstawie wcześniejszych badań [19] oraz dostępnej literatury [24, 76, 90, 97, 98].

W wyniku wymieszania węgla z wyżej wymienionymi odpadami uzyskano 18 mieszanek, z których następnie przygotowywano próbki do badań własności fizykochemicznych zgodnie z normą [52]. Każdy pomiar powtórzono pięciokrotnie, następnie wyniki badań uśredniono.

Charakterystyka materiałów użytych do badań laboratoryjnych

Tabela 3.1

Rodzaj materiału	Zawartość popiołu, A_a [%]	Zawartość części lotnych, V_{daf} [%]	Wartość opałowa Q_{ai} [MJ/kg]	Wilgoć analityczna W_a [%]	Zawartość siarki, S_t [%]
Węgiel kamienny	16,42	24,27	27,46	1,12	0,52
Guma z opon samochodów osobowych	8,13	55,74	31,63	0,25	1,64
Guma z opon samochodów ciężarowych	9,75	60,20	36,61	0,31	1,88
Taśma z przenośnika taśmowego	10,17	57,23	37,93	0,48	0,96

3.3. Wyniki badań laboratoryjnych

Zamieszczony poniżej rysunek 3.1 przedstawia zmianę zawartości popiołu w mieszankach węgla z badanymi odpadami gumowymi w przedziale od 0 do 15% udziału masowego odpadów.

Na rysunku 3.2 przedstawiono zmianę wartości opałowej paliwa w mieszankach węgla z badanymi odpadami w przedziale od 0 do 15% udziału masowego odpadów. Wartość opałową analityczną obliczono zgodnie z normą [56] na podstawie ciepła spalania oznaczonego w kalorymetrze LECO AC 350, opisaną wzorem 3.1.

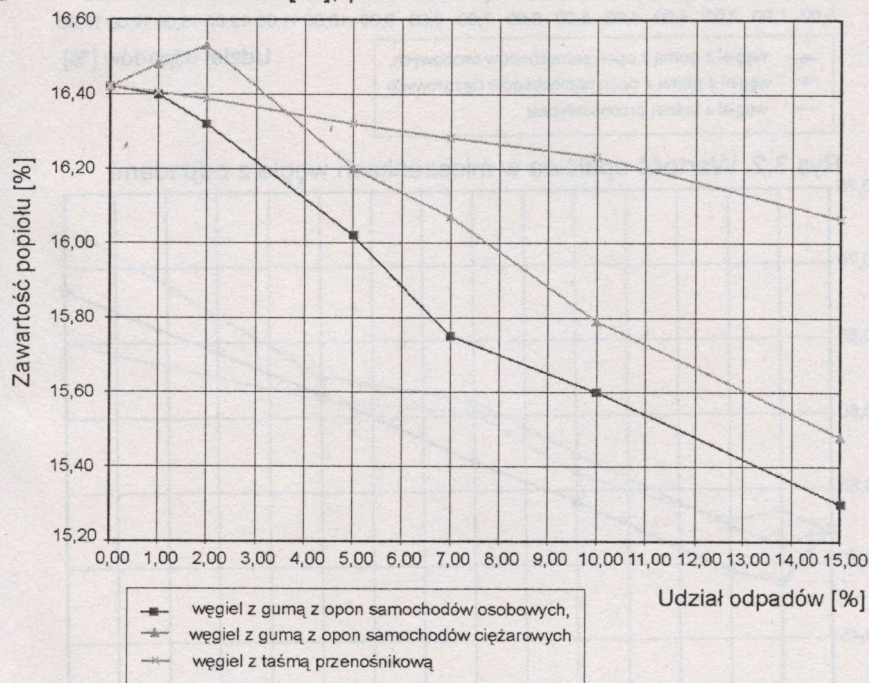
Wartość opałowa analityczna:

$$W_{da} = Q_{sa} - 24,42 (W_a + 8,94 H_a) \quad (3.1)$$

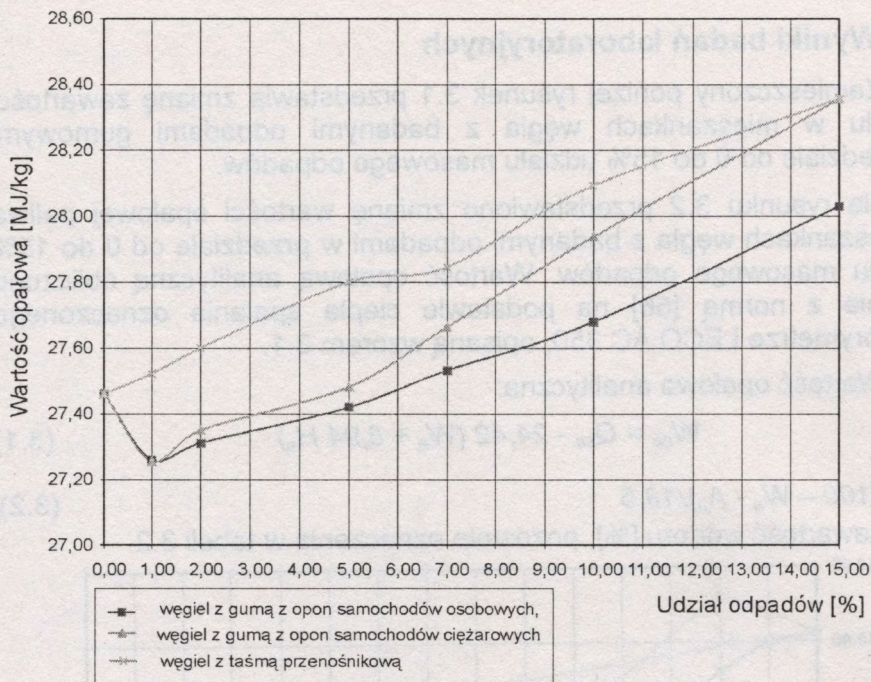
gdzie:

$$H_a = (100 - W_a - A_a)/18,5 \quad (3.2)$$

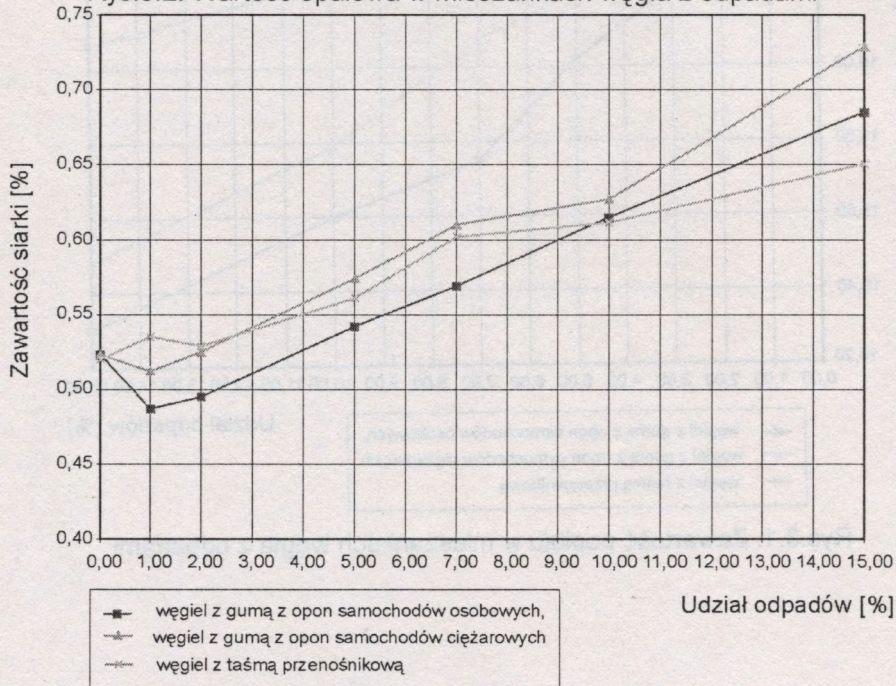
H_a – zawartość wodoru [%], pozostałe oznaczenia w tabeli 3.2.



Rys.3.1. Zawartość popiołu w mieszankach węgla z odpadami



Rys.3.2. Wartość opałowa w mieszankach węgla z odpadami



Rys.3.3. Zawartość siarki w mieszankach węgla z odpadami

Badania laboratoryjne wykazały, że przy zwiększającym się udziale odpadu gumowego w składzie mieszanki zawartość popiołu jest coraz mniejsza, w stosunku do czystego węgla.

Wykazano, że zawartość siarki w mieszance węgla kamiennego w każdym z odpadów wzrasta w miarę zwiększania się jego procentowego udziału, natomiast szybkość jego wzrostu jest najmniejsza dla gumy z taśmy przenośnikowej. Stwierdzono również, że wraz z procentowym wzrostem udziału gumy z opon samochodów osobowych i ciężarowych oraz taśmy przenośnikowej w mieszance wartość opałowa jest większa. Odstępstwa od liniowego wpływu udziału paliw z odpadów na badania właściwości fizykochemicznych mieszanek wynikają prawdopodobnie z błędów pomiarowych spowodowanych niejednorodnością odpadowych paliw alternatywnych oraz zróżnicowaną kinetyką spalania węgla kamiennego i gumy.

Zestawienie wyników analiz mieszanki węgla z gumą z opon samochodów ciężarowych (GC), udział gumy stanowi procent masy paliwa

Tabela 3.2

Pozycja	Oznaczenie	Jednostka	Paliwo							
			Węgiel	Guma	Węgiel + 1% GC	Węgiel + 2% GC	Węgiel + 5% GC	Węgiel + 7% GC	Węgiel + 10% GC	Węgiel + 15% GC
Wilgoć analityczna	W _a	%	1,12	0,31	1,03	1,05	1,03	0,99	0,96	0,91
Popiół	A _a	%	16,42	9,75	16,48	16,53	16,20	16,07	15,79	15,48
Części lotne	V _{daf}	%	24,27	60,20	24,13	24,56	25,84	26,56	27,79	29,72
Siarka całkowita	S _{ta}	%	0,523	1,875	0,512	0,525	0,574	0,610	0,627	0,729
Siarka popiołowa	S _{Aa}	%	0,146	0,257	0,166	0,153	0,178	0,183	0,185	0,210
Siarka palna	S _{Ca}	%	0,378	1,618	0,346	0,372	0,396	0,427	0,442	0,519
Ciepło spalania	Q _{sa}	MJ/kg	28,46	37,68	28,25	28,35	28,48	28,67	28,95	29,36
Wartość opałowa	W _{da}	MJ/kg	27,46	36,61	27,26	27,35	27,48	27,66	27,94	28,36

Na podstawie uzyskanych wyników badań własności fizykochemicznych mieszanek węgla kamiennego z odpadami alternatywnymi, do dalszych badań stanowiskowych oraz własności reakcyjnych przyjęto gumę z opon pojazdów ciężarowych. Udział gumy z opon pojazdów ciężarowych w mieszance paliwowej określono w przedziale od 0 do 10% jej masy.

Zestawienie wyników analiz dla mieszanek węgla z gumą z opon pojazdów ciężarowych przedstawiono w tabeli 3.2.

4. Wpływ warunków spalania na efekty analizowanego procesu

Celem badań stanowiskowych było empiryczne wyznaczenie charakterystyk ekologicznych oraz energetycznych procesu współspalania węgla w piecu rusztowym symulującym komorę spalania kotła rusztowego.

Charakterystyki powyższego procesu stanowią równania określające zależności między zmierzonymi efektami procesu spalania (udziałami CO_2 , CO , NO_x , SO_2 w spalinach oraz strumieniem entalpii spalin i części palne w żużlu), a warunkami spalania (parametrami eksploatacyjnymi – patrz punkt 4.3).

Innymi słowy, poszukiwane charakterystyki tworzą równania aproksymacyjne między wymienionymi wielkościami, przy czym warunki spalania traktuje się jako zmienne niezależne (wejściowe), zaś parametry określające efekty spalania jako zmienne zależne (wyjściowe).

Charakterystyki energetyczne w literaturze przedmiotu często noszą nazwę funkcji obiektu lub funkcji procesu [48, 49, 50].

4.1. Symulacja procesu spalania paliwa w kotle o ruszcie ruchomym za pomocą badań przeprowadzonych w piecu o ruszcie stałym

W paleniskach kotłowych wyposażonych w ruszt ruchomy jakość (skład) określonej porcji paliwa, przesuwającej się wzdłuż długości rusztu ulega zmianie zależnie od czasu jej przebywania na ruszcie oraz sposobu (wielkości i rozdziału strumienia) doprowadzenia powietrza.

Przy stałej prędkości przesuwu rusztu wspomniany czas jest zdeterminowany przez odległość danej porcji paliwa od miejsca jego dostarczenia na ruszt, tzn. od warstwowicy. Sposób doprowadzenia powietrza do spalania uzyskuje się przez zainstalowanie pod rusztem lokalnych stref zasilanych zróżnicowanymi strumieniami powietrza.

Efektem procesu spalania jest uzyskanie w tej samej chwili, wzdłuż długości rusztu spalin zmiennych ze względu na ich strumień, temperaturę i skład.

W komorze spalania następuje homogenizacja wspomnianych parametrów spalin. Czasem następuje również częściowe lub całkowite dopalanie ich palnych składników.

Proces spalania paliwa ma charakter lokalnie ustalony.

Efekty procesu spalania paliwa na ruszcie ruchomym można [24], jak się wydaje, z dobrym przybliżeniem analizować w oparciu o eksperymentalną analizę wyników tego procesu przeprowadzonego w palenisku o ruszcie stałym.

Należy w tym celu paliwo znajdujące się na ruszcie stałym traktować jako wcześniej wspomnianą porcję paliwa przesuwającą się wzdłuż rusztu ruchomego. Równocześnie wymagana jest zmiana w czasie sposobu doprowadzenia powietrza do komory spalania, odpowiadająca poszczególnym momentom przebywania paliwa na ruszcie ruchomym.

Parametry spalin odpowiadające warunkom występującym w przypadku rusztu ruchomego uzyskuje się jako wartości średnioważone występujące w poszczególnych krokach czasowych.

W każdym z kroków należy równocześnie przeprowadzić pomiar parametrów spalin. Praktycznie wymaga to wyróżnienia w badaniach odpowiednio licznych kroków czasowych. Podczas każdego z wyróżnionych kroków doprowadza się stały strumień powietrza, który jest jednak odpowiednio zróżnicowany między poszczególnymi krokami.

Zaletą tego sposobu badań jest możliwość ich prowadzenia:

- na stosunkowo prostym stanowisku badawczym, o niskich nakładach inwestycyjnych, możliwym do wykonania we własnym zakresie przez badacza,
- przy wykorzystaniu do badań małych ilości paliwa.

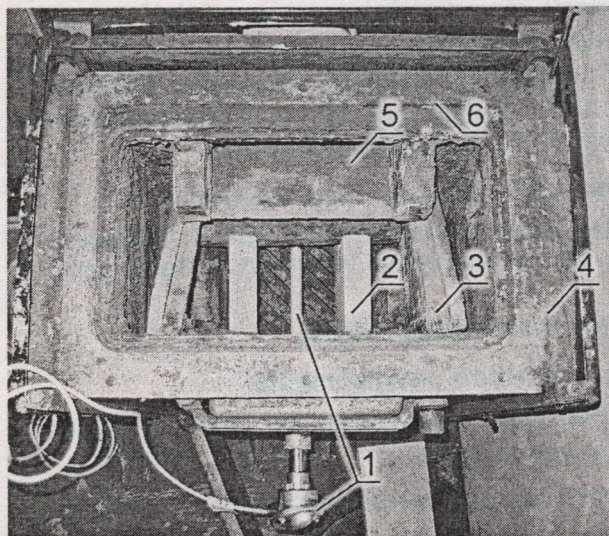
Wadą jest natomiast brak możliwości uwzględnienia:

- przekazywania (przewodzenia) ciepła w paliwie wzdłuż długości rusztu,
- dopalania spalin w komorze paleniskowej,
- właściwości akumulacyjnych ścian komory paleniskowej.

4.2. Opis stanowiska badawczego

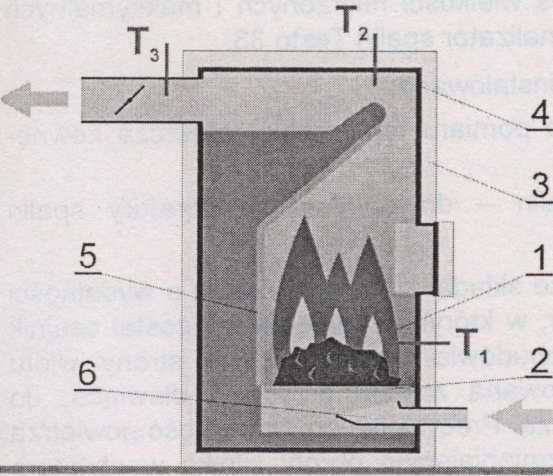
Badania eksperymentalne przeprowadzano na specjalnie wybudowanym do tego celu autorskim stanowisku badawczym (rys. 4.4). Stanowisko badawcze zbudowane zostało z następujących głównych elementów.

Głównym elementem stanowiska badawczego był piec żeliwny typu „Żar” o mocy cieplnej około 10 kW. Piec ten z zewnątrz został obudowany dwiema warstwami wełny mineralnej typu Rockwool odpornej na temperaturę do 1000°C. Komora spalania została wyłożona ogniotrwałą cegłą szamotową w celu zaizolowania i podniesienia pojemności cieplnej. W komorze pieca, w odległości 10 cm nad rusztem umieszczono jedną termoparę typu Czaki 802S w osłonie ceramicznej. Drugą termoparę typu Czaki 203K zainstalowano za wymurowaniem pieca. Trzeci termoelement typu Czaki 203K umieszczono w kanale spalin. W kanale spalin umieszczono również przepustnicę spalin, oraz podpięto sondy analizatora spalin typu Testo 33. Piec został uszczelniony za pomocą sznura ogniotrwałego, silikonu odpornego na temperaturę 350°C i szamotu. Pod rusztem umieszczono króciec wyrównujący prędkość powietrza dostarczanego przez wentylator o regulowanej wydajności. Regulacja parametrów wentylatora odbywała się dwuetapowo: zgrubnie poprzez zmniejszenie przekroju, poprzez który zasysany był strumień powietrza na wlocie do wentylatora oraz dokładnie – regulacja potencjometrem wpływająca na prędkość obrotową silnika wentylatora. Strumień dostarczanego poprzez szczelny układ rur powietrza był mierzony przez anemometr AZ 8901. Układ ten pozwalał na płynną zmianę strumienia powietrza w trakcie procesu. Schemat stanowiska badawczego został przedstawiony na rysunku 4.2.



Rys.4.1. Modernizacja wymurowania pieca „Żar” oraz montaż termopary w osłonie ceramicznej

- 1 – termopara ceramiczna,
- 2 – wymurowanie szamotowe,
- 3 – wymurowanie pieca,
- 4 – izolacja (wełna typu Rockwool),
- 5 – wylot spalin do komina,
- 6 – obudowa żeliwna pieca



Rys.4.2. Schemat stanowiska badawczego do symulacji pieca rusztowego
1 – komora spalania, 2 – ruszt paleniska, 3 – izolacja termiczna, 4 – obudowa pieca, 5 – wymurówka ogniotrwała, 6 – doprowadzenie powietrza, T1, T2, T3 – termopary

Analizator spalin TESTO 33 z oprzyrządowaniem posłużył do pomiaru ciśnienia i temperatury oraz stężeń O₂, CO, CO₂, NO_x, SO₂ w spalinach.

Zamieszczona poniżej tabela 4.1 zawiera podstawowe parametry techniczne, jakimi charakteryzuje się analizator spalin zastosowany w stanowisku badawczym.

Charakterystyka parametrów analizatora Testo 33

Tabela 4.1

Wielkość mierzona	Zakres pomiarowy	Maksymalne odchylenie
Wielkość mierzona	-40 do +1200°C	0,1°C 1°C powyżej 1000°C
Pomiar ciągu/ciśnienie	±50 hPa	0,1% objętości
Pomiar różnicy ciśnień	100 hPa	0,1% objętości

Zakres wielkości mierzonych analizatora Testo 33

Tabela 4.2

Wielkość mierzona	Zakres pomiarowy	Maksymalne odchylenie
Pomiar O ₂	0 do 21% objętości	±0,2% objętości
Pomiar CO ₂	0 do CO ₂ max	±0,2% objętości
Pomiar CO	0 do 40.000 ppm	±20 ppm, do 400 ppm ±5%, do 2000 ppm ±10%, powyżej 2000 ppm
Pomiar NO	0 do 3.000 ppm	±20 ppm, do 400 ppm ±5%, powyżej 400 ppm
Pomiar NO ₂	0 do 500 ppm	±10 ppm
Pomiar SO ₂	0 do 500 ppm	±20 ppm, do 400 ppm ±5%, powyżej 400 ppm

Tabela 4.2 zawiera zakres wielkości mierzonych i maksymalnych odchyłeń charakteryzujących analizator spalin Testo 33.

Termoelementy zostały zainstalowane:

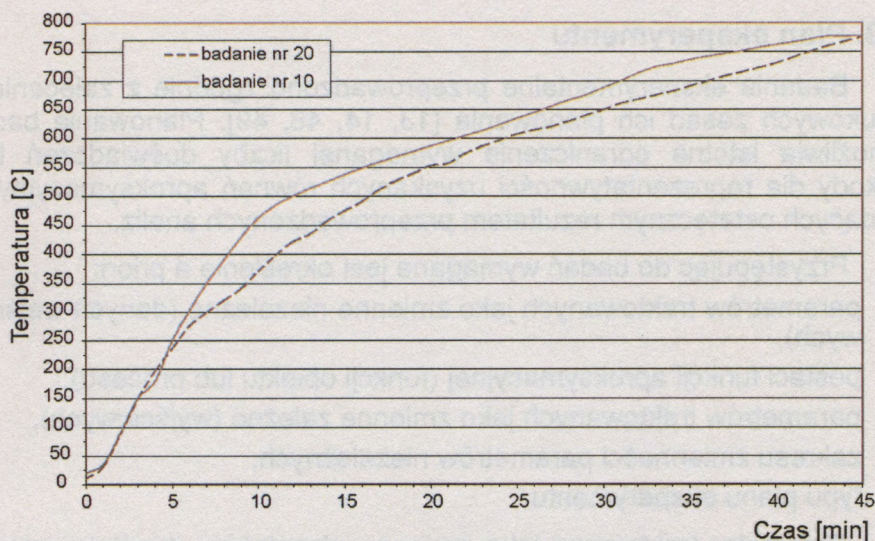
- za wymurówką pieca – do pomiaru temperatury płaszcza zewnętrznego pieca,
- w kanale wylotowym spalin – do pomiaru temperatury spalin w kominie.

Układ zasilania w powietrze składał się z wentylatora o wydajności do 230 m³/h oraz z systemu rur, w których zamontowany został czujnik anemometru AZ 8901. Na obudowie wentylatora od strony wlotu tłoczonego powietrza zainstalowana została przysłona dławiąca, do zgrubnej regulacji ilości powietrza. Precyzyjnie chwilową ilość powietrza reguluje się potencjometrem zmieniającym obroty silnika wentylatora według wskazań zainstalowanego anemometru.

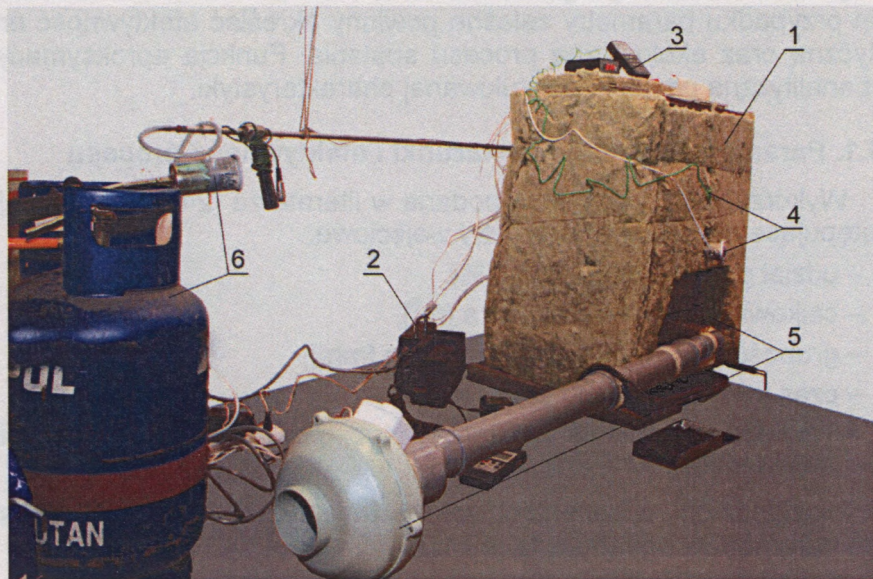
4.2.1. Wstępne wygrzewanie komory spalania

Komora spalania stanowiska do symulacji kotła rusztowego przed wykonaniem pomiaru była wstępnie każdorazowo wygrzewana do temperatury spalin wylotowych 775°C, w czasie 45 minut. Wartość temperatury została założona na podstawie danych literaturowych [24, 85, 86], natomiast czas wygrzewania jest następstwem wynikającym z wydajności palnika i układu jego zasilania. Układ do wstępnego wygrzewania komory spalania zbudowany został z butli gazowej zawierającej propan – butan połączonej poprzez reduktor oraz zawór regulacyjny z palnikiem gazowym o mocy maksymalnej 27 kW.

Komora spalania wstępnie wygrzewana była poprzez otwór wycięty w pokrywie pieca poniżej rusztu. Płomień wraz z spalinami palnika gazowego rozgrzewały ruszt oraz ścianki komory spalania. Po osiągnięciu zadanej temperatury (775°C) i załadunku paliwa do pieca następował jego samozapłon od temperatury ścianek i rusztu. Po zamknięciu pokrywy do tego samego otworu zainstalowana była stalowa rura z uszczelnieniem układu doprowadzającego powietrze. Na rysunku 4.3 przedstawiono przykładowe krzywe wygrzewania komory spalania stanowiska badawczego do zadanej temperatury spalin 775°C w czasie.



Rys.4.3. Wykres wygrzewania komory spalania stanowiska badawczego do temperatury 775°C dla przykładowego badania nr 10 i 20



Rys.4.4. Stanowisko badawcze do symulacji pracy kotła rusztowego

Stanowisko badawcze (rys. 4.4) zbudowane jest z następujących elementów: 1 – piec rusztowy żeliwny typu „Żar”; 2 – analizator spalin Testo 33; 3 – rejestratory temperatury EMT 100 i EMT 302; 4 – termopary; 5 – układ zasilania pieca w powietrze do spalania; 6 – układ do wstępnego wygrzewania komory spalania.

4.3. Plan eksperymentu

Badania eksperymentalne przeprowadzono zgodnie z zaleceniami naukowych zasad ich planowania [13, 14, 48, 49]. Planowanie badań umożliwia istotne ograniczenie wymaganej liczby doświadczeń bez szkody dla reprezentatywności uzyskanych równań aproksymacyjnych, będących ostatecznym rezultatem przeprowadzonych analiz.

Przystępując do badań wymagane jest określenie a priori:

- parametrów traktowanych jako zmienne niezależne (danych wejściowych),
- postaci funkcji aproksymacyjnej (funkcji obiektu lub procesu),
- parametrów traktowanych jako zmienne zależne (wyjściowych),
- zakresu zmienności parametrów niezależnych,
- typu planu eksperymentu.

Parametry traktowane jako zmienne niezależne określają warunki realizacji procesu spalania. Są one w eksperymencie nastawiane. Parametry zaś zależne są uzyskiwane na drodze pomiarów. W analizowanym przypadku parametry zależne powinny określać efektywność energetyczną oraz ekologiczną procesu spalania. Funkcja aproksymacyjna jest analityczną postacią poszukiwanej charakterystyki.

4.3.1. Parametry określające warunki i efektywność procesu

Wykorzystując informacje podane w literaturze [24, 85, 86] przyjęto następujące niezależne parametry wejściowe:

- x_1 – udział gumy w mieszance [%],
- x_2 – całkowity strumień powietrza [m^3],
- x_3 – grubość warstwy paliwa na ruszcie [mm],
- x_4 – czas trwania procesu [min],
- x_5 – rozkład strumienia dostarczonego powietrza (moment osiągnięcia maksimum) [%].

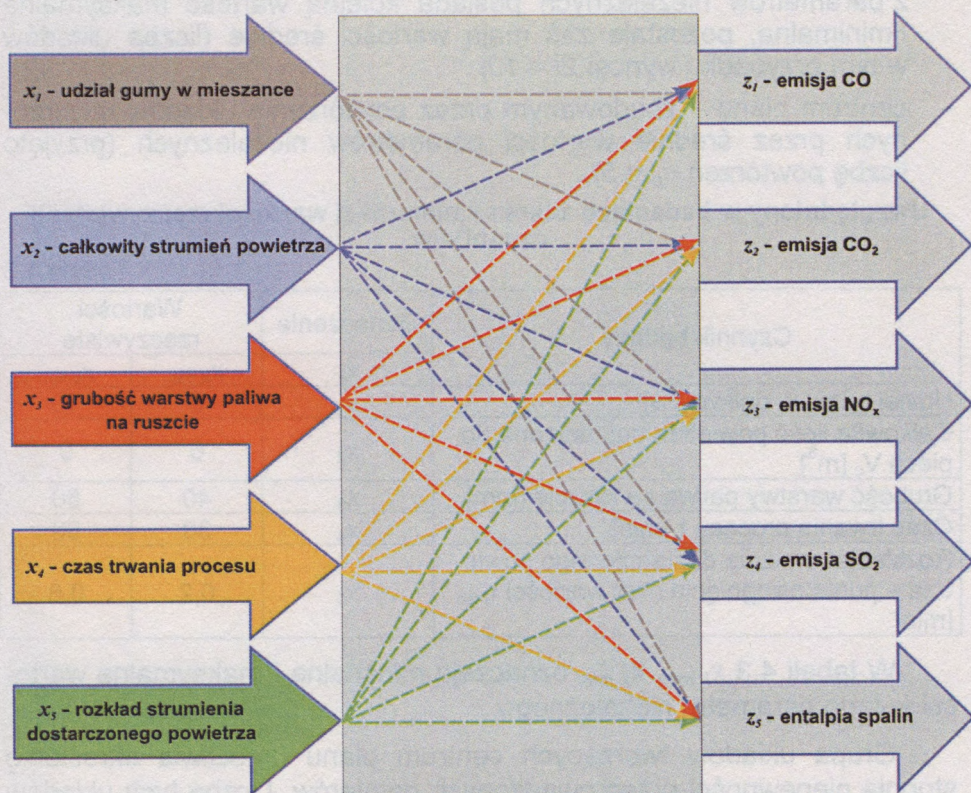
Uwzględniony w badaniach zakres zmienności wcześniej wymienionych parametrów podano w tabeli 4.3.

Za zależne parametry wynikowe uznano:

- z_1 – emisja CO, kmol,
- z_2 – emisja CO₂, kmol,
- z_3 – emisja NO_x, kmol,
- z_4 – emisja SO₂, kmol,
- z_5 – strumień entalpii spalin, kJ,

Funkcja obiektu jest zależnością aproksymującą wyniki pomiarów z dokładnością pozwalającą na określenie dowolnych warunków prowadzenia procesu spalania.

Graficzną ilustrację współzależności określanych przez funkcję obiektu przedstawia rysunek 4.5.



Rys.4.5. Wpływ zmiennych niezależnych na parametry określające efekty spalania (zmiennie zależne)

4.3.2. Proponowany plan eksperymentu

Z teorii eksperymentu wynikają zalecane warianty układów pomiarowych. Przez układ pomiarowy rozumie się kombinację wartości zmiennych niezależnych przyjętych przy pomiarze kolejnych zmiennych zależnych.

Stanowiskowe badania eksperymentalne w niniejszej pracy przyjęto przeprowadzić w oparciu o statystyczny, zdeterminowany polisekcyjny plan rotacyjno-ortogonalny [48, 49,50]. W planie tym wyróżnia się trzy charakterystyczne grupy układów:

- jądro planu utworzone z układów dwuwartościowego planu frakcyjnego, odpowiadające $i = 5$ parametrom niezależnym, o maksymalnej liczbie redukcji planu $p = 2$ (liczba układów jądra planu wynosi więc: $n = 2^{i-p}$),
- tzw. punkty gwiazdne utworzone przez układy, w których jeden z parametrów niezależnych posiada kolejną wartość maksymalną i minimalną, pozostałe zaś mają wartości średnie (liczba układów w tym przypadku wynosi $2i = 10$),
- centrum planu – zbudowanym przez powtórzenie układów utworzonych przez średnie wartości parametrów niezależnych (przyjęto liczbę powtórzeń $n_o = 5$).

Uwzględniony w badaniach zakres zmienności wartości rzeczywistych czynników

Tabela 4.3

Czynnik badany	Oznaczenie	Wartości rzeczywiste	
	X_k	$X_{k\min}$	$X_{k\max}$
Udział gumy w paliwie [%]	x_1	0	10
Całkowita ilość powietrza dostarczana do pieca V_c [m ³]	x_2	6	9
Grubość warstwy paliwa na ruszcie [mm]	x_3	40	80
Czas trwania procesu τ [min]	x_4	30	90
Rozkład strumienia dostarczonego powietrza – punkt osiągnięcia max wartości $\tau_{\max}$ [min]	x_5	0,2	0,6

W tabeli 4.3 $x_{k\min}$, $x_{k\max}$ oznaczają minimalne i maksymalne wartości k -tego parametru niezależnego.

Grupa układów tworzących centrum planu umożliwia określenie stopnia niepewności przeprowadzonych pomiarów. Liczba tych układów powinna być co najmniej równa minimalnej liczbie losowej najmniej wymagającego (jeżeli chodzi o liczbę powtórzeń) rozkładu statystycznego t -Studenta [49, 104]. Przyjęta liczba n_o spełnia graniczne wymagania tego rozkładu.

W celu ujednolicenia wpływu poszczególnych parametrów niezależnych wprowadza się standaryzację ich wartości. W przypadku planu rotalnego wykorzystuje się zbiór pięciu parametrów standaryzowanych (unormowanych).

$$\hat{x}_k \in [-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha]$$

gdzie: $\hat{x}_k$ – standaryzowana wartość niezależnego parametru x_k .

Wartości $-\alpha$, $+\alpha$ odpowiadają minimalnej i maksymalnej wartości danego parametru niezależnego. Zero odpowiada jego wartości średniej, według [49] dla planu rotalnego:

$$|\alpha| = 2^{0,25(i-p)} = 1,68 \quad (4.1)$$

W niniejszej pracy dla uproszczenia układów wejściowych do pomiarów przyjęto dla planu rotalno-ortogonalnego $\alpha = 2$. Wartość ta jest zalecana w literaturze [49] i jest to jednoznaczne z przyjęciem przy określaniu α , $p = 1$.

Równocześnie wartości x_k odpowiada wartość standaryzowana [49]:

$$\hat{x}_k = \alpha_k \frac{2x_k - (x_{kmax} + x_{kmin})}{(x_{kmax} - x_{kmin})} \quad (4.2)$$

gdzie: x_{kmax} , x_{kmin} – maksymalna i minimalna wartość parametru x_k .

Dla $\alpha = 2$ wartość standaryzowaną 1 uzyskuje się dla:

$$x_k = 0,25(3x_{kmax} + x_{kmin}) \quad (4.3)$$

4.3.3. Funkcja obiektu

Jako funkcję obiektu w dostępnej literaturze [48, 49, 50] sugeruje się stosowanie w analogicznych badaniach wielomianu stopnia drugiego:

$$z = b_0 + \sum_{k=1}^{k=i} b_k x_k + \sum_{k=1}^{k=i} b_{kk} x_k^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ g>1}}^{k=i} b_{kg} x_k x_g \quad (4.4)$$

gdzie:

z – zmienna zależna (mierzona, wynikowa),

b – współczynnik wielomianu,

x – zmienna niezależna (nastawiana),

i – liczba zmiennych niezależnych,

k, g – indeksy identyfikacyjne współczynników eksperymentalnych oraz zmiennych niezależnych.

Dla przyjętej wcześniej liczby zmiennych niezależnych $i = 5$ całkowita liczba współczynników wielomianu wynosi [48, 49]:

$$N = \frac{(i+1)(i+2)}{2} = 21 \quad (4.5)$$

Poszukiwana funkcja obiektu ma postać [49]:

$$\begin{aligned} z = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \\ & + b_{44} x_4^2 + b_{55} x_5^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{15} x_1 x_5 + b_{23} x_2 x_3 \\ & + b_{24} x_2 x_4 + b_{25} x_2 x_5 + b_{34} x_3 x_4 + b_{35} x_3 x_5 + b_{45} x_4 x_5 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Liczba współczynników wielomianu ($N = 21$) determinuje minimalną liczbę eksperymentów pomiarowych. Poprzez rozwiązanie układów 21 równań, osobnych dla poszczególnych wartości emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, strumienia entalpii spalin oraz pozostałości części palnych można bowiem wyznaczyć wszystkie współczynniki wielomianu, a tym samym poszukiwane charakterystyki procesu.

Równocześnie warto zauważyć, że wykorzystanie większej liczby eksperymentów umożliwia lepsze korygowanie błędów pomiarów, a tym samym uzyskanie dokładniejszych wyników.

Wielomian ten (funkcja obiektu), umożliwi określenie emisji dla dowolnej mieszanki paliwowej węgla z gumą w zakresie uwzględniającym zmienność parametrów eksploatacyjnych.

4.3.4. Charakterystyka planu badań

W tabeli 4.4 przedstawiono układy składowe planu rotacyjno-ortogonalnego:

Charakterystyka planu rotacyjno-ortogonalnego [48, 49]

Tabela 4.4

u	$\hat{X}_1$	$\hat{X}_2$	$\hat{X}_3$	$\hat{X}_4$	$\hat{X}_5$	Grupa układów		
1	-1	-1	-1	-1	-1	(1)	Symbolika Yatesa [49]	Plan frakcyjny
2	+1	+1	-1	-1	-1	ab		
3	-1	-1	+1	+1	-1	cd		
4	+1	-1	+1	-1	+1	ace		
5	-1	+1	+1	-1	+1	bce		
6	+1	-1	-1	+1	+1	ade		
7	-1	+1	-1	+1	+1	bde		
8	+1	+1	+1	+1	-1	abcd		
9	$-\alpha$	0	0	0	0	Plan gwiazdny		
10	$+\alpha$	0	0	0	0			
11	0	$-\alpha$	0	0	0			
12	0	$+\alpha$	0	0	0			
13	0	0	$-\alpha$	0	0			
14	0	0	$+\alpha$	0	0			
15	0	0	0	$-\alpha$	0			
16	0	0	0	$+\alpha$	0			
17	0	0	0	0	$-\alpha$			
18	0	0	0	0	$+\alpha$			
19	0	0	0	0	0	Plan centrum		
20	0	0	0	0	0			
21	0	0	0	0	0			
22	0	0	0	0	0			
23	0	0	0	0	0			

Do powyższej tabeli należy podstawić rzeczywiste i unormowane wartości z tabeli 4.3, które uwzględniono przy kolejnych 23 testach.

Wstawiając w tabeli 4.4, w miejsce wartości standaryzowanych (unormowanych) odpowiadające im wartości rzeczywiste parametrów zmiennych niezależnych (tabela 4.3) uzyskuje się plan badań przedstawiony w tabeli 4.5.

Plan badań na stanowisku do symulacji kotła rusztowego

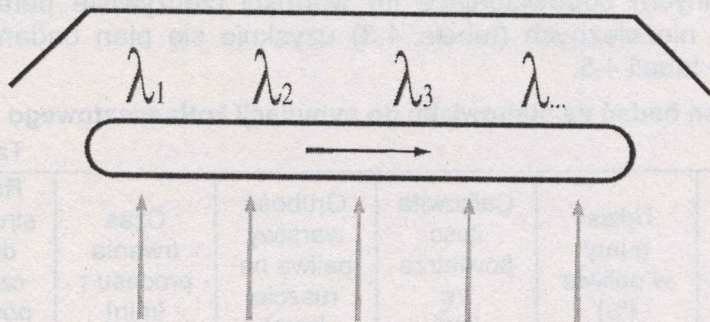
Tabela 4.5

Badanie nr	Udział gumy w paliwie [%]	Całkowita ilość powietrza V_c [m ³]	Grubość warstwy paliwa na ruszcie [mm]	Czas trwania procesu τ [min]	Rozkład strumienia dostarczonego powietrza $-\tau_{max}$
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	2,5	6,75	50	45	0,3
2	7,5	8,25	50	45	0,3
3	2,5	6,75	70	75	0,3
4	7,5	6,75	70	45	0,5
5	2,5	8,25	70	45	0,5
6	7,5	6,75	50	75	0,5
7	2,5	8,25	50	75	0,5
8	7,5	8,25	70	75	0,3
9	0	7,5	60	60	0,4
10	10	7,5	60	60	0,4
11	5	6	60	60	0,4
12	5	9	60	60	0,4
13	5	7,5	40	60	0,4
14	5	7,5	80	60	0,4
15	5	7,5	60	30	0,4
16	5	7,5	60	90	0,4
17	5	7,5	60	60	0,2
18	5	7,5	60	60	0,6
19	5	7,5	60	60	0,4
20	5	7,5	60	60	0,4
21	5	7,5	60	60	0,4
22	5	7,5	60	60	0,4
23	5	7,5	60	60	0,4

4.4. Strumień doprowadzonego powietrza

W rzeczywistym piecu rusztowym w każdym miejscu, wzdłuż jego długości, występuje inny stosunek nadmiaru powietrza λ - rysunek 4.6. Współczynnik nadmiaru powietrza w palenisku z rusztem mechanicznym

powinien wynosić od 1,3-1,6 [78, 79]. Rozkład zapotrzebowania powietrza zależy od: grubości warstwy spalanego paliwa, która jest inna na początku i inna na końcu rusztu, rodzaju spalanego paliwa [77-82], prędkości przesuwania rusztu.



Rys.4.6. Zmiana wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ wzdłuż długości rusztu

Jako że w przedstawionym stanowisku badawczym ruszt jest nieruchomy, zmiana strumienia powietrza wzdłuż jego długości symulowana jest poprzez korektę wydajności wentylatora w czasie realizacji procesu. Czas jest w tym przypadku parametrem charakteryzującym symulowaną lokalizację rozpatrywanej porcji paliwa na ruszcie ruchomym. Przy stałej prędkości posuwu rusztu relacja między czasem spalania paliwa na ruszcie nieruchomym, a lokalizacją porcji paliwa określa zależność:

$$\tau = \frac{x}{w} \quad (4.7)$$

gdzie:

τ – czas spalania paliwa na ruszcie stałym,

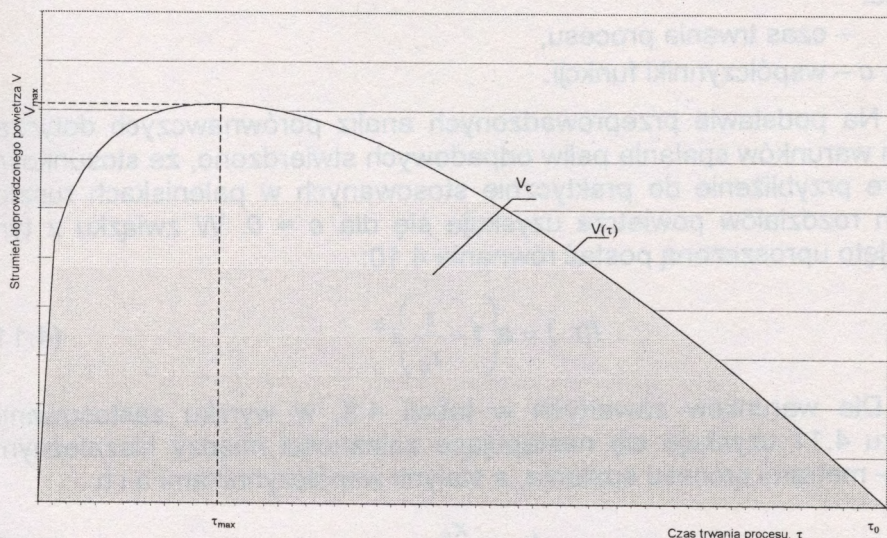
x – symulowana odległość próbki od początku rusztu,

w – stała prędkość posuwu rusztu.

Aby właściwie korygować wydajność wentylatora w trakcie realizacji procesu spalania, należy określić odpowiednią zależność $\dot{V}(x)$ chwilowego strumienia doprowadzanego powietrza od czasu (rys. 4.7). Pole powierzchni pod krzywą wyznaczonej funkcji jest równe ilości V_c doprowadzanego powietrza do spalania mieszanki paliwa. Ilość V_c doprowadzonego powietrza może być określona w oparciu o ilość i skład paliwa oraz uśrednioną procesową wartość stosunku nadmiaru powietrza do spalania λ .

Wielkość $\dot{V}(\tau)$ powinna spełniać następujące warunki:

$$\int_0^{\tau_0} \dot{V}(\tau) d\tau = V_c \quad (4.8)$$



Rys.4.7. Funkcja opisująca strumień doprowadzonego powietrza w czasie trwania procesu

przy czym:

$$\left. \frac{d\dot{V}(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_{max}} = 0$$

$$\dot{V}(0) = 0$$

$$\dot{V}(\tau_0) = 0$$

gdzie:

τ_{max} – czas występowania maksymalnego strumienia powietrza w procesie,

τ_0 – czas trwania procesu spalania,

V_0 – początkowy strumień powietrza.

Odpowiednikiem funkcji $\dot{V}(\tau)$ w przypadku rusztu ruchomego powinna być funkcja $\varphi(x)$ [24]:

$$\varphi(x) = a \left(1 - \frac{x}{l} \right) x^b \exp^{cx} \quad (4.9)$$

gdzie:

x – położenie paliwa na ruszcie,

l – długość rusztu,

a, b, c – współczynniki funkcji.

W pracy [24] dla rusztu stałego przyjęto następującą postać funkcji:

$$f(\tau) = a \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right) \tau^b \exp^{c\tau} \quad (4.10)$$

gdzie:

τ_0 – czas trwania procesu,

a, b, c – współczynniki funkcji.

Na podstawie przeprowadzonych analiz porównawczych dotyczących warunków spalania paliw odpadowych stwierdzono, że stosunkowo dobre przybliżenie do praktycznie stosowanych w paleniskach rusztowych rozdziałów powietrza uzyskuje się dla $c \approx 0$. W związku z tym przyjęto uproszczoną postać równania 4.10:

$$f(\tau) = a \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right) \tau^b \quad (4.11)$$

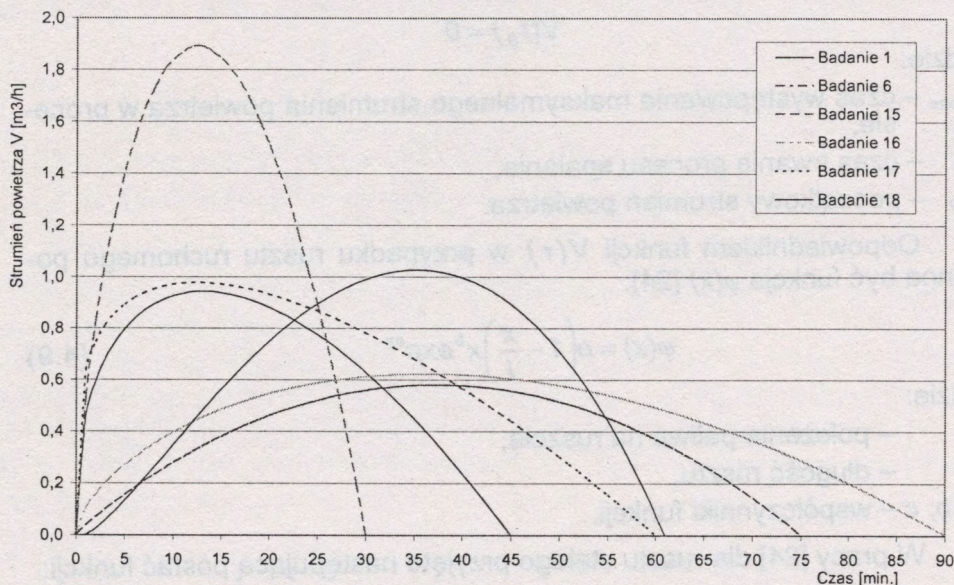
Dla warunków zawartych w tabeli 4.3, w wyniku zastosowania wzoru 4.11 uzyskuje się następujące zależności między niezależnymi parametrami procesu spalania, a stałymi współczynnikami a i b :

$$b = \frac{x_5}{1 - x_5} \quad (4.12)$$

oraz:

$$a = \frac{x_2(b+1)(b+2)}{x_4^{b+1}} \quad (4.13)$$

Na rysunku 4.8 przedstawiono przykładowe funkcje rozdziału powietrza w analizowanych procesach spalania (proces nr 1, 6, 15, 16, 17, 18).



Rys.4.8. Rozkład strumienia doprowadzonego powietrza i jego całkowita ilość w czasie trwania symulacji procesów numer: 1, 6, 15, 16, 17, 18

4.5. Sposób przeprowadzenia badań

Pomiary były przeprowadzone na stanowisku do symulacji w okresie letnim, dzięki czemu warunki atmosferyczne były na porównywalnym poziomie (temperatury zewnętrzne 22-26°C). W trakcie pomiarów został zrealizowany cały plan badań (tabela 4.5).

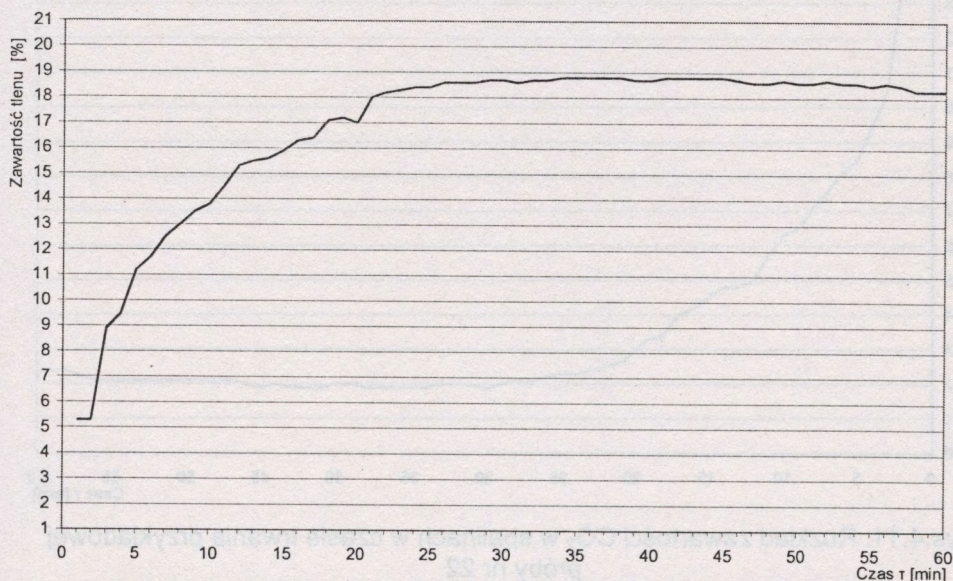
Badania składu elementarnego analizowanych paliw służących do przygotowania mieszanek oraz popiołów po spaleniu wykonano w Katedrze Chemii i Technologii Nieorganicznej Wydziału Chemicznego oraz w Katedrze Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

Dostosowanie strumienia powietrza dostarczonego do komory paleniskowej do przyjętej funkcji rozdziału (równanie 4.11) przeprowadzono w odstępach jednogodzinnych. W takich samych przedziałach czasu dokonywano odczytu wielkości mierzonych.

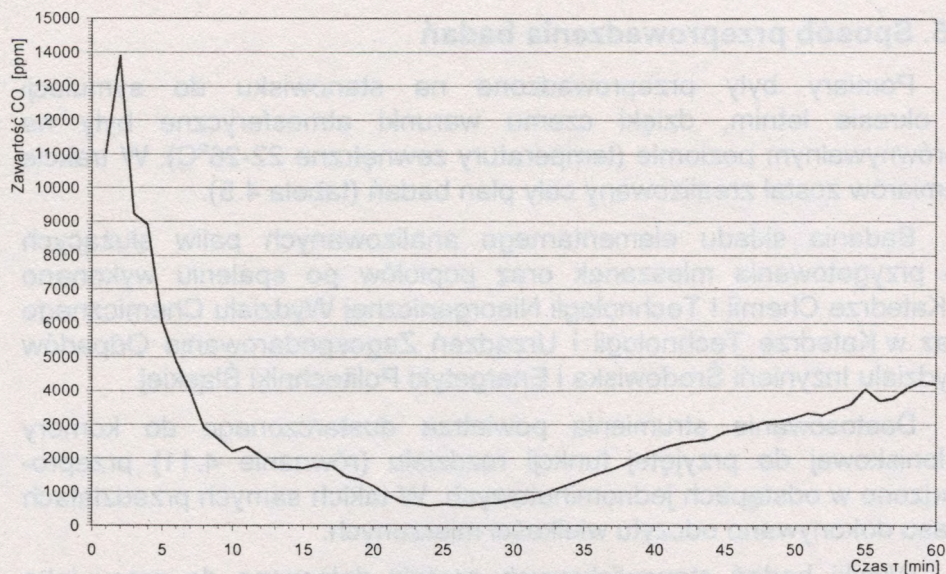
Wyniki badań stanowiskowych zostały dołączone do pracy jako załączniki.

4.6. Wyniki przeprowadzenia badań

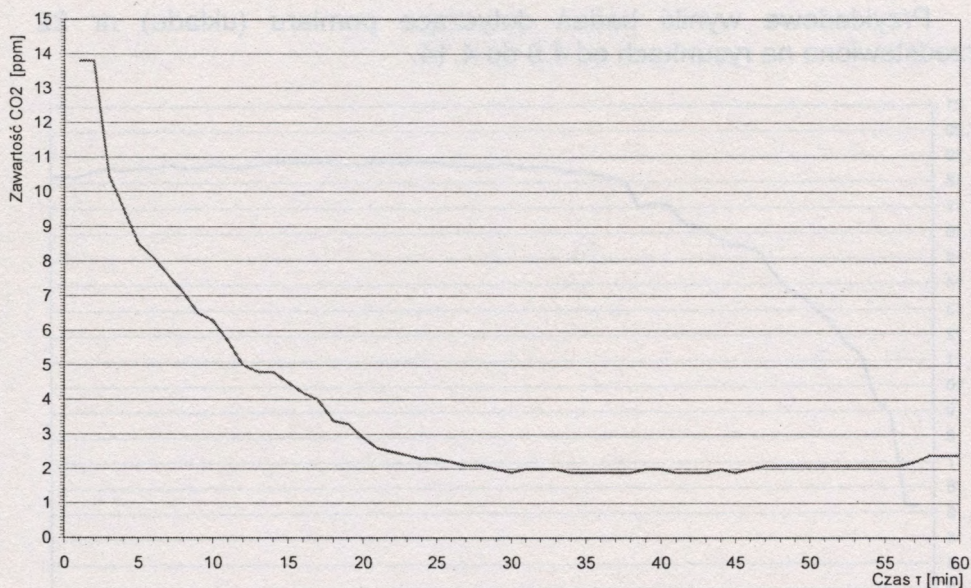
Przykładowe wyniki badań dotyczące pomiaru (układu) nr 22 przedstawiono na rysunkach od 4.9 do 4.14.



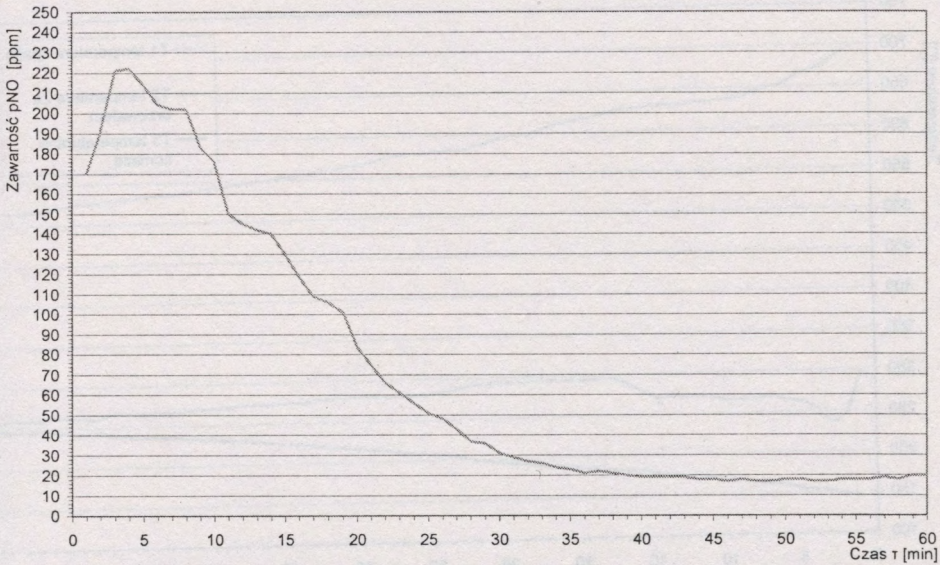
Rys.4.9. Rozkład zawartości O_2 w spalinach w czasie trwania przykładowej próby nr 22



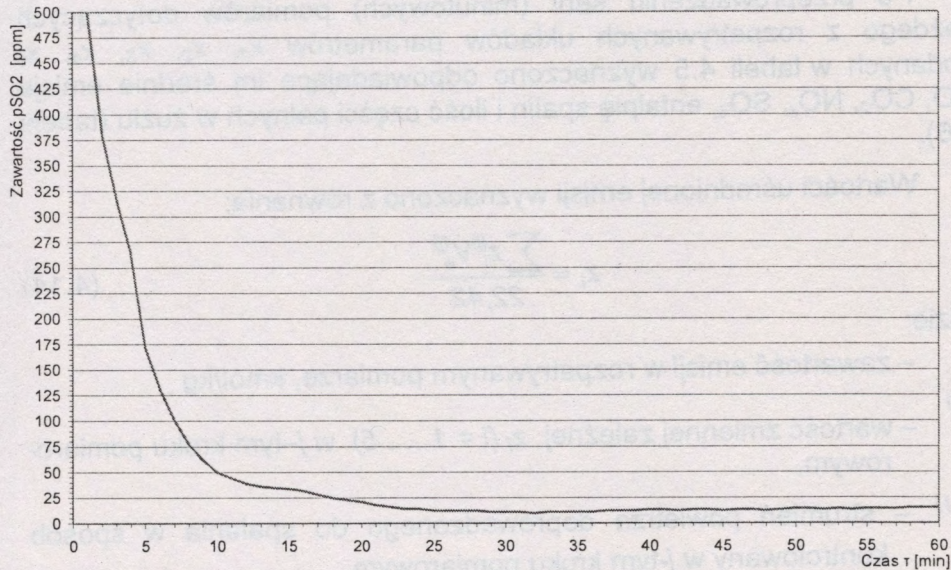
Rys.4.10. Rozkład zawartości CO w spalinach w czasie trwania przykładowej próby nr 22



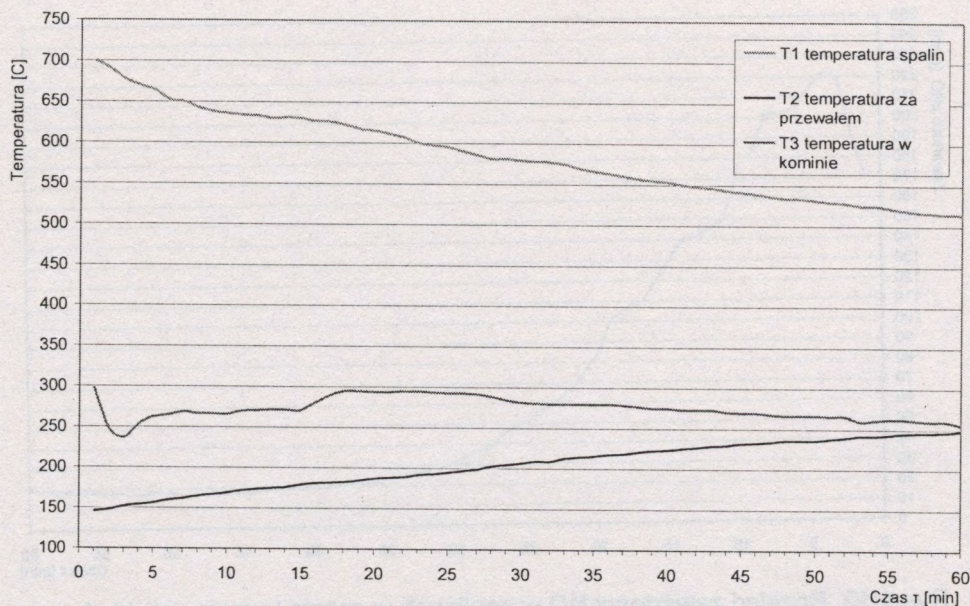
Rys.4.11. Rozkład zawartości CO₂ w spalinach w czasie trwania przykładowej próby nr 22



Rys.4.12. Rozkład zawartości NO w spalinach w czasie trwania przykładowej próby nr 22



Rys.4.13. Rozkład zawartości SO₂ w spalinach w czasie trwania przykładowej próby nr 22



Rys.4.14. Rozkład temperatur w poszczególnych punktach pomiarowych w czasie trwania przykładowej próby nr 22

Po przeprowadzeniu serii (minutowych) pomiarów dotyczących każdego z rozpatrywanych układów parametrów x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 podanych w tabeli 4.5 wyznaczono odpowiadające im średnie emisje $\text{CO}, \text{CO}_2, \text{NO}_x, \text{SO}_2$, entalpię spalin i ilość części palnych w żużlu (tabela 4.6).

Wartości uśrednionej emisji wyznaczono z równania:

$$z_i = \frac{\sum z_i^{(j)} \dot{V}_a^{(j)}}{22,42} \quad (4.14)$$

gdzie:

z_i – zawartość emisji w rozpatrywanym pomiarze, kmol/kg

$z_i^{(j)}$ – wartość zmiennej zależnej z_i ($i = 1 \dots 5$) w j -tym kroku pomiarowym,

$\dot{V}_a^{(j)}$ – strumień powietrza doprowadzonego do spalania w sposób kontrolowany w j -tym kroku pomiarowym.

Sumaryczne wyniki pomiarów na stanowisku do symulacji kotła rusztowego

Tabela 4.6

Numer pomiaru (układu)	CO [kmol/kg]	CO ₂ [kmol/kg]	NO _x [kmol/kg]	SO ₂ [kmol/kg]	Entalpia spalin [kJ/kg]	Części palne w żużlu [%]
1	0,000579	0,0108	0,0000248	0,0000100	0,048088	64,46
2	0,000450	0,0104	0,0000232	0,0000057	0,058778	63,74
3	0,000780	0,0144	0,0000337	0,0000119	0,067321	58,03
4	0,000602	0,0140	0,0000322	0,0000075	0,067325	60,22
5	0,000752	0,0176	0,0000456	0,0000297	0,082255	63,12
6	0,000542	0,0074	0,0000111	0,0000043	0,048084	62,01
7	0,000849	0,0110	0,0000143	0,0000089	0,058776	62,59
8	0,000873	0,0174	0,0000372	0,0000101	0,082291	58,43
9	0,000868	0,0195	0,0000279	0,0000206	0,064180	55,84
10	0,001080	0,0177	0,0000320	0,0000311	0,064180	56,35
11	0,000623	0,0095	0,0000207	0,0000138	0,051386	60,60
12	0,001190	0,0180	0,0000340	0,0000202	0,077008	60,18
13	0,000781	0,0103	0,0000149	0,0000245	0,042745	59,49
14	0,000727	0,0202	0,0000490	0,0000133	0,085573	56,65
15	0,000761	0,0153	0,0000437	0,0000143	0,064204	59,93
16	0,000683	0,0124	0,0000217	0,0000068	0,064124	61,72
17	0,001590	0,0270	0,0000354	0,0000305	0,064427	62,42
18	0,000968	0,0157	0,0000248	0,0000186	0,064456	60,93
19	0,000943	0,0131	0,0000284	0,0000187	0,064117	61,47
20	0,000628	0,0116	0,0000221	0,0000047	0,064117	58,42
21	0,000827	0,0144	0,0000331	0,0000118	0,064117	50,77
22	0,000860	0,0135	0,0000294	0,0000144	0,064117	62,78
23	0,000761	0,0134	0,0000271	0,0000141	0,064117	66,18

4.7. Wyznaczone funkcje obiektu

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów wykonanych zgodnie z założonym planem badań zostały wyznaczone funkcje obiektu dla emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz ilości wytworzonego ciepła (entalpii spalin).

Współczynniki b_n wielomianów dla poszczególnych emisji zostały wyznaczone w programie Matlab [84] poprzez rozwiązanie układu równań zapisanych w formie macierzowej:

$$|Z| = |X| \cdot |B| \quad (4.15)$$

który po przekształceniu daje macierz wyników:

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Z \quad (4.16)$$

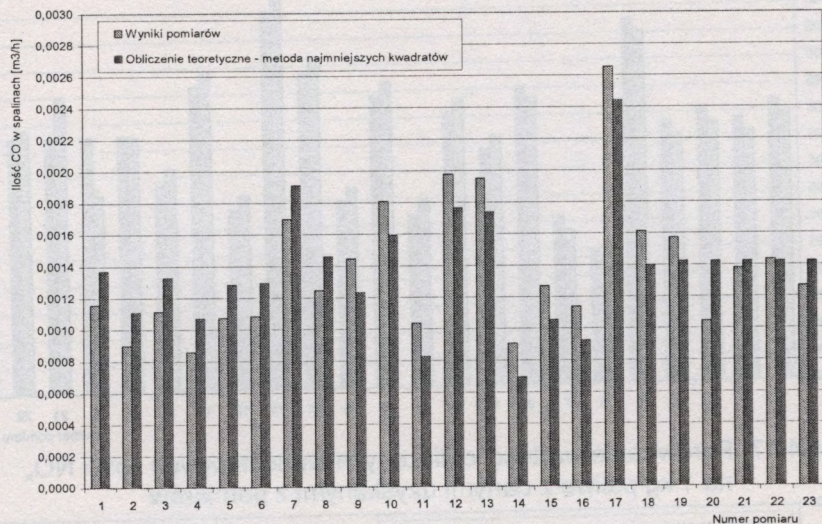
Współczynniki b zostały wyznaczone poprzez rozwiązanie układu równań metodą najmniejszych kwadratów (tabela 4.7).

Współczynniki b dla poszczególnych funkcji obiektu dla emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz entalpii spalin

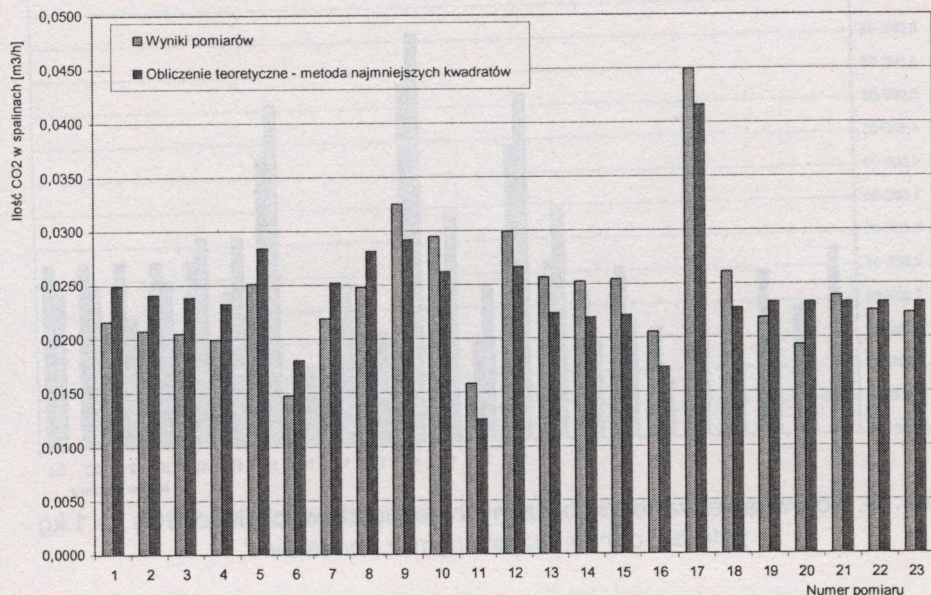
Tabela 4.7

Lp.	Oznaczenie współczynnika	Wartości współczynników dotyczących					
		Emisji CO	Emisji CO ₂	Emisji NO _x	Emisji SO ₂	Entalpii spalin	Części palnych
1	b_0	0,3057313	3,9375800	-0,001456	0,0069320	50316,5	28,032171
2	b_1	0,1153512	1,4468153	-0,000374	0,0027846	17458,1	11,10153
3	b_2	0,0810407	1,0132919	-0,000141	0,0020333	11351,9	8,0656572
4	b_3	-0,029253	-0,370215	0,0000987	-0,000698	-4308,2	-2,683542
5	b_4	-0,000509	-0,006311	0,0000017	-0,000013	-247,4	-0,146337
6	b_5	-0,018117	-0,200259	-0,000334	-0,000662	1660,6	-2,583569
7	b_{11}	-0,0000004	0,0001748	0,0000000	0,0000003	-1,0	-0,000985
8	b_{22}	-0,0000573	-0,001656	-0,000002	-0,000003	-64,2	0,0081404
9	b_{33}	-0,0000005	-0,000002	0,0000000	0,0000000	0,04884	-0,000012
10	b_{44}	-0,0000005	-0,000004	0,0000000	0,0000000	0,05084	0,0000252
11	b_{55}	0,0124354	0,2223487	0,0000014	0,0001367	-233,30	0,7791489
12	b_{12}	-0,0181692	-0,227347	0,0000543	-0,000439	-2682,5	-1,73672
13	b_{13}	0,0006778	0,0084715	-0,000002	0,0000161	92,9	0,0608806
14	b_{14}	-0,0003324	-0,004242	0,0000013	-0,000008	-49,4	-0,028511
15	b_{15}	0,0005873	0,0062405	0,0000085	-0,000004	155,8	-0,020000
16	b_{23}	0,0016617	0,0212641	-0,000006	0,0000385	253,89498	0,1431280
17	b_{24}	-0,0014973	-0,018747	0,0000042	-0,000036	-202,1203	-0,135424
18	b_{25}	0,0027907	0,0048450	0,0000631	0,0001454	457,75167	0,0803333
19	b_{34}	0,0002251	0,0028155	-0,0000007	0,0000054	33,35717	0,0216567
20	b_{35}	-0,000177	-0,000520	-0,000002	0,0000002	-81,67812	0,0175750
21	b_{45}	-0,000129	-0,001018	-0,000002	-0,00001	-15,33642	0,0061000

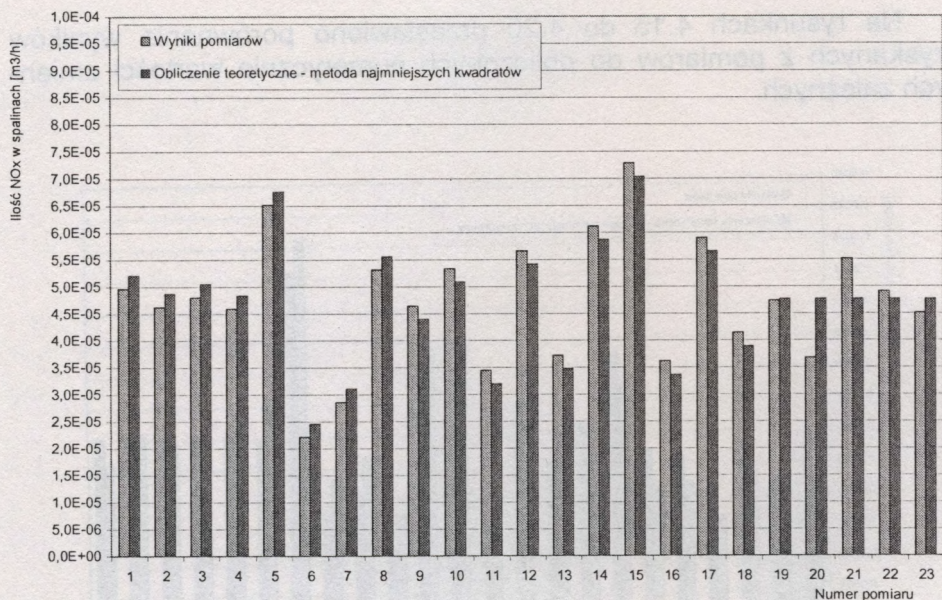
Na rysunkach 4.15 do 4.20 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych z pomiarów do obliczonych numerycznie wartości zmiennych zależnych.



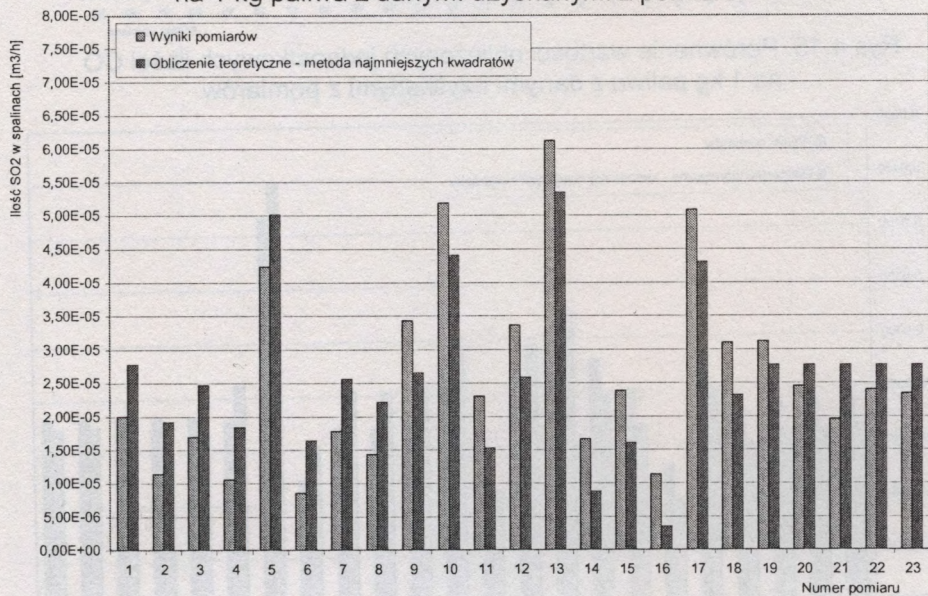
Rys.4.15. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości CO na 1 kg paliwa z danymi uzyskanymi z pomiarów



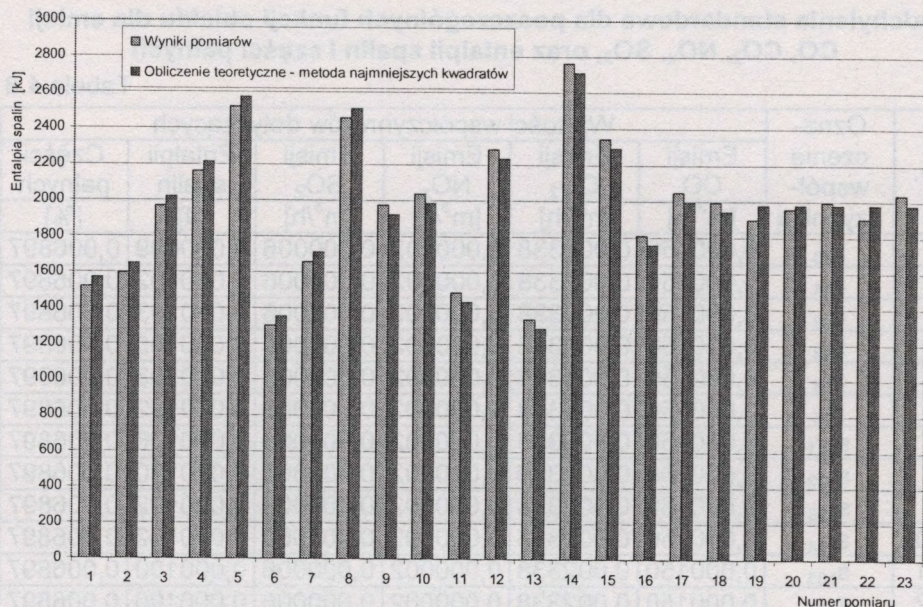
Rys.4.16. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości CO₂ na 1 kg z danymi uzyskanymi z pomiarów



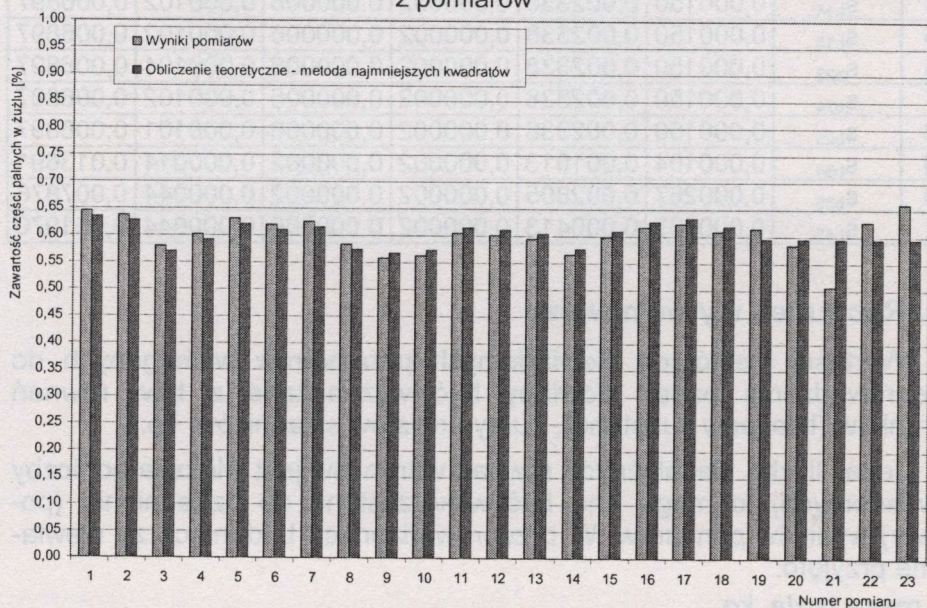
Rys.4.17. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości NO_x na 1 kg paliwa z danymi uzyskanymi z pomiarów



Rys.4.18. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości SO₂ na 1 kg paliwa z danymi uzyskanymi z pomiarów



Rys.4.19. Porównanie wartości obliczonych entalpii spalin z danymi uzyskanymi z pomiarów



Rys.4.20. Porównanie wartości obliczonych zawartości części lotnych w żużlu z danymi uzyskanymi z pomiarów

W tabeli 4.8 przedstawiono standardowe odchylenia dla poszczególnych funkcji obiektu dla CO , CO_2 , NO_x , SO_2 , oraz entalpii spalin i części palnych w żużlu.

**Odchylenia standardowe dla poszczególnych funkcji obiektu dla emisji
CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz entalpii spalin i części palnych**

Tabela 4.8

Lp.	Ozna- czenie współ- czynnika	Wartości współczynników dotyczących					
		Emisji CO	Emisji CO ₂	Emisji NO _x	Emisji SO ₂	Entalpii spalin	Części palnych
		[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[J]	[%]
1	S _{b0}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000099	0,006897
2	S _{b1}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
3	S _{b2}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000103	0,006897
4	S _{b3}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000105	0,006897
5	S _{b4}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000103	0,006897
6	S _{b5}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
7	S _{b11}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000106	0,006897
8	S _{b22}	0,000150	0,002339	0,000002	0,000006	0,000100	0,006897
9	S _{b33}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
10	S _{b44}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
11	S _{b55}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000100	0,006897
12	S _{b12}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000100	0,006897
13	S _{b13}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000100	0,006897
14	S _{b14}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
15	S _{b15}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
16	S _{b23}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000104	0,006897
17	S _{b24}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000102	0,006897
18	S _{b25}	0,000150	0,002338	0,000002	0,000006	0,000101	0,006897
19	S _{b34}	0,000104	0,001013	0,000002	0,000002	0,000044	0,013691
20	S _{b35}	0,000267	0,002805	0,000002	0,000002	0,000044	0,007876
21	S _{b45}	0,000033	0,000413	0,000002	0,000006	0,000044	0,061970

4.8. Rachunek wyrównawczy

Wartości niektórych niewiadomych parametrów wymaganych do przeprowadzenia badań powinny być wyznaczane z tzw. równań warunków (bilansów substancji, sumy udziałów składników, itp.).

Jeżeli liczba niezależnych równań warunków jest większa od liczby niewiadomych, to mogą one być wykorzystane do uzgadniania (poprawy) wyników pomiarów. W przeprowadzonych badaniach za niewiadome przyjęto:

- masa żużla, kg,
- zawartość N₂ w spalinach, %,
- zawartość H₂O w spalinach, %,
- V_{ss} ilość spalin suchych, m³.

Przedstawione w poprzednim rozdziale wielkości mierzone (wyniki badań) obarczone są niedokładnością wynikającą z wielu czynników:

- dokładności urządzeń pomiarowych,
- warunków otoczenia,
- dokładności, z jaką przygotowano mieszanke,
- jakości wybudowanego stanowiska do symulacji.

Mogą więc mieć bezpośredni wpływ na dokładność obliczeń wielkości niewiadomych.

4.8.1. Skład elementarny paliw

Dla przeprowadzenia rachunku wyrównawczego zostały wykonane badania składu elementarnego paliwa, odpadu oraz żużla powstałego po spaleniu.

Tabela 4.9 przedstawia wyniki badania składu elementarnego analizowanych paliw służących do przygotowania mieszanek oraz popiołów po spaleniu, wykonanych w Katedrze Chemii i Technologii Nieorganicznej Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Natomiast tabela 4.10 przedstawia zawartość części palnych w żużlu powstałego po spaleniu 23 badanych próbek; badania zostały przeprowadzone w Katedrze Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

Skład elementarny badanych paliw i odpadów

Tabela 4.9

Paliwo / odpad	Węgiel C ^a [%]	Wodór H ^a [%]	Azot N ^a [%]	Siarka S ^a [%]	Tlen O ^a [%]	Wilgoć W ^a [%]	Popiół A ^a [%]
Węgiel	80,47	4,705	1,72	0,24	12,87	1,12	16,42
Guma z opon samochodów ciężarowych	77,825	6,545	0,43	1,935	13,27	0,31	9,75
Żużel	4,955	0,15	0,18	1,685	0	–	–

Zawartość części palnych w żużlu

Tabela 4.10

Numer próbki	1	2	3	4	5
Zawartość części palnych [%]	64,46	63,74	58,03	60,22	63,12
Numer próbki	6	7	8	9	10
Zawartość części palnych [%]	62,01	62,59	58,43	55,84	56,35
Numer próbki	11	12	13	14	15
Zawartość części palnych [%]	60,60	60,18	59,49	56,65	59,93
Numer próbki	16	17	18	19	20
Zawartość części palnych [%]	61,72	62,42	60,93	61,47	58,42
Numer próbki	21	22	23	–	–
Zawartość części palnych [%]	50,77	62,78	66,18	–	–

4.8.2. Równania bilansowe

W procesie uzgadniania wykorzystano następujące równania warunków:

Bilans pierwiastka węgla:

$$\frac{1}{M_C} (m_w g_{Cw} + m_g g_{Cg} - m_{zuż} g_C) - A(n''_{CO_2} + n''_{CO}) = 0 \quad (4.17)$$

Bilans azotu:

$$\frac{1}{M_{N_2}} (m_w g_{Nw} + m_g g_{Ng} - m_{zuż} g_{N_{zuż}}) + DV_{pow} - n''_{N_2} - 0,5An''_{NO} = 0 \quad (4.18)$$

Bilans siarki:

$$\frac{1}{M_S} (m_w g_{Sw} + m_g g_{Sg} - m_{zuż} g_{S_{zuż}}) - An''_{SO_2} = 0 \quad (4.19)$$

Bilans tlenu:

$$\frac{1}{M_{O_2}} (m_w g_{Ow} + m_g g_{Og}) + \frac{0,5}{M_{H_2O}} m_{H_2O_{cal}} + V_{pow} (B + 0,5G) + \\ - A(n''_{O_2} + n''_{CO_2} + n''_{SO_2}) - 0,5(n''_{H_2O} + A(n''_{CO} + n''_{NO})) = 0 \quad (4.20)$$

Bilans wodoru:

$$\frac{1}{M_{H_2}} (m_w g_{H_2w} + m_g g_{H_2g}) + \frac{1}{M_{H_2O}} m_{H_2O_{cal}} + GV_{pow} - n''_{H_2O} = 0 \quad (4.21)$$

Bilans żużla i popiołu:

$$m_{zuż} - m_{zuż} g_{cz.p.zz.} - m_w g_{Pw} - m_g g_{Pg} = 0 \quad (4.22)$$

Bilans spalin:

$$CV_{sp.s} - A(n''_{CO_2} + n''_{SO_2} + n''_{CO} + n''_{NO} + n''_{O_2}) - n''_{N_2} = 0 \quad (4.23)$$

Współczynniki występujące w równaniach bilansowych wyliczono:

$$A = \frac{V_{sp.s.}}{V_{pow}} \quad (4.24)$$

$$B = \frac{1}{22,42} \cdot \frac{0,21}{1 + X'_{zpow}}, [kmol / m^3 n] \quad (4.25)$$

$$C = \frac{1}{22,42}, [kmol / m^3 n] \quad (4.26)$$

$$D = \frac{1}{22,42} \cdot \frac{0,79}{1 + X'_{zpow}}, [\text{kmol} / \text{m}^3 \text{n}] \quad (4.27)$$

$$G = \frac{1}{22,42} \cdot \frac{X'_{zpow}}{1 + X'_{zpow}}, [\text{kmol} / \text{m}^3 \text{n}] \quad (4.28)$$

X'_{zpow} – dla temperatury 22°C oraz wilgotności względnej 60% molo-
wy stopień zawiżenia powietrza suchego wynosi 0,01 kg/kg [18, 38].

Objaśnienia oznaczeń w równaniach 4.17 do 4.23 podano w tabeli 4.11

Wykaz oznaczeń wartości zastosowanych w równaniach bilansowych

Tabela 4.11

Oznaczenie	Jednostka	Opis
$g_{Nw}, g_{O2w}, g_{Cw}, g_{Sw},$ g_{H2w}, g_{Pw}	-	udział gramowy w węglu pierwiastków: azotu, tlenu, węgla, siarki, wodoru i popiołu
$g_{Nw}, g_{O2w}, g_{Cw}, g_{Sw},$ g_{H2w}, g_{Pw}	-	udział gramowy w gumie z opon samocho- dowych pierwiastków: azotu, tlenu, węgla, siarki, wodoru i popiołu
$M_w, M_{O2}, M_C, M_S,$ M_{H2}, M_{H2O}	[kg/kmol]	masa drobinowa: azotu, tlenu, węgla, siarki, wodoru i wody
$m_w, m_g, m_{zuż}, m_{H2O}$	[kg]	masa: węgla, gumy, żużla, wilgoci w odpadach
$n''_{N2}, n''_{O2}, n''_{CO2},$ $n''_{CO}, n''_{NO}, n''_{S2O},$ n''_{H2O}	[kmol]	ilość w spalinach $N_2, O_2, CO_2, CO, NO, SO_2,$ H_2O
$g_{cz.p.zuż}, g_{czuż}, g_{Nzuż},$ $g_{Szuż}$	-	Udział gramowy w żużlu odpowiednio: części palnych, węgla, azotu i siarki
$V_{sp.s.}$	[m ³]	objętość spalin suchych

Poszczególne współczynniki zastosowane w równaniach bilanso-
wych wynoszą:

Wartości współczynników zastosowanych w równaniach bilansowych

Tabela 4.12

Współczynnik	Wartość
B	0,00927
C	22,42
D	0,03488
G	0,0004416

Na podstawie danych literaturowych [78] został wyznaczony współ-
czynnik A dla węgla kamiennego stosowanego w badaniach.

Rachunek wyrównawczy przeprowadzono [3] w oparciu o ogólnie
dostępny biblioteczny program [12].

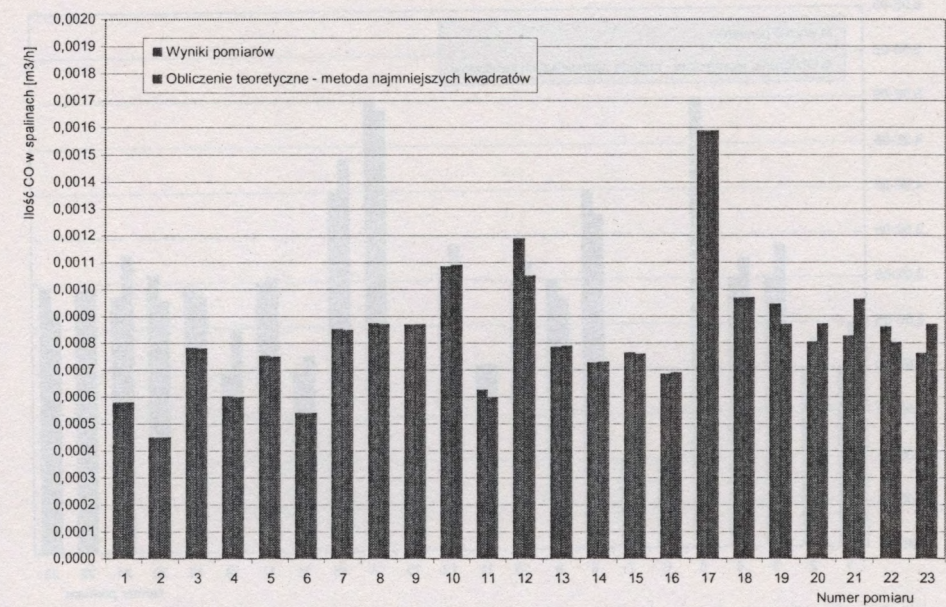
Tabela 4.13 zawiera współczynniki *b* dla poszczególnych funkcji obiektu dla emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz entalpii spalin i części lotnych, wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów, dla uzgodnionych wartości wektora *Z*.

Współczynniki *b* dla poszczególnych funkcji obiektu dla emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz entalpii spalin, wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów po uzgodnieniu bilansów

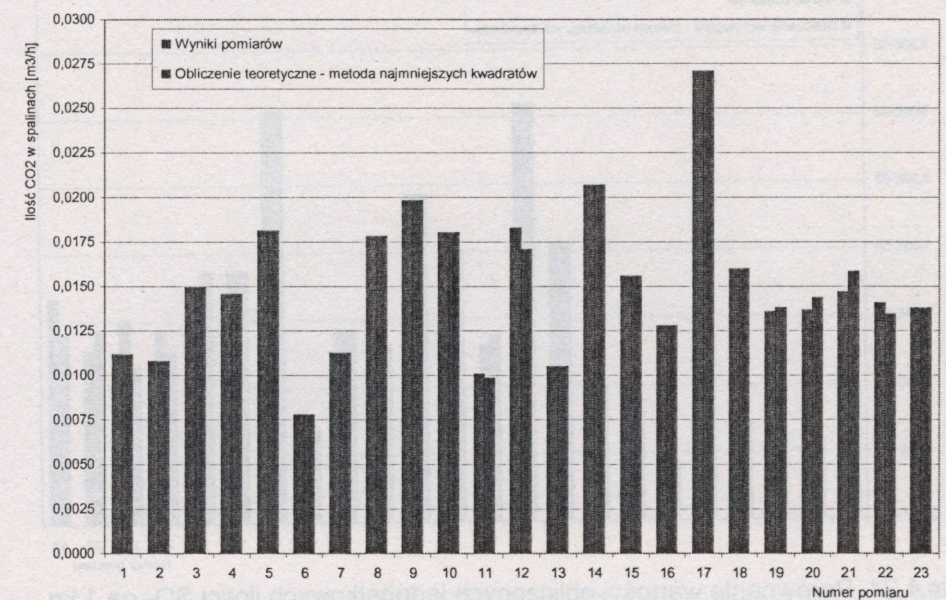
Tabela 4.13

Lp.	Oznaczenie współczynnika	Wartości współczynników dotyczących					
		Emisji CO	Emisji CO ₂	Emisji NO _x	Emisji SO ₂	Entalpii spalin	Części palnych
1	b ₀	1,248585	17,1410445	0,0389246	0,0256643	1393329	299,840867
2	b ₁	-0,080468	-1,1269471	-0,0024037	-0,0015013	-83345,1	-15,425767
3	b ₂	0,020294	0,2953972	0,0005517	0,0002998	17459,76	1,9032885
4	b ₃	-0,001489	-0,0151523	-0,0000644	-0,0000565	-2850,34	-1,0528437
5	b ₄	-0,056626	-0,7834449	-0,0017361	-0,0011228	-61274,9	-12,442030
6	b ₅	1,451545	19,3376872	0,0468410	0,0323095	1724441	404,589368
7	b ₁₁	-0,000014	-0,0003664	0,0000006	0,0000013	41,72	0,0331976
8	b ₂₂	0,000042	0,0010365	-0,0000003	-0,0000013	-46,52	-0,0516091
9	b ₃₃	-0,001017	-0,0142078	-0,0000306	-0,0000194	-1062,46	-0,2029853
10	b ₄₄	0,000150	0,0020921	0,0000045	0,0000029	157,44	0,0301331
11	b ₅₅	-1,555893	-21,291511	-0,0486353	-0,0321779	-1742018	-371,19566
12	b ₁₂	-0,000160	-0,0025023	-0,0000033	-0,0000013	-71,26	0,0242859
13	b ₁₃	0,001219	0,0171160	0,0000360	0,0000224	1240,55	0,2214604
14	b ₁₄	0,000142	0,0019954	0,0000043	0,0000027	146,21	0,0270803
15	b ₁₅	0,004342	0,0696466	0,0000826	0,0000107	2294,50	-0,7199740
16	b ₂₃	0,002533	0,0351956	0,0000769	0,0000492	2692,44	0,5318227
17	b ₂₄	-0,003474	-0,0484872	-0,0001046	-0,0000663	-3635,18	-0,6955421
18	b ₂₅	0,088164	1,1780004	0,0028501	0,0019676	104547,5	25,1302931
19	b ₃₄	0,001578	0,0218834	0,0000481	0,0000309	1688,10	0,3372306
20	b ₃₅	-0,068191	-0,9318033	-0,0021229	-0,0014018	-75927,1	-16,33725
21	b ₄₅	0,041166	0,5788079	0,0012282	0,0007665	42416,90	7,7886253

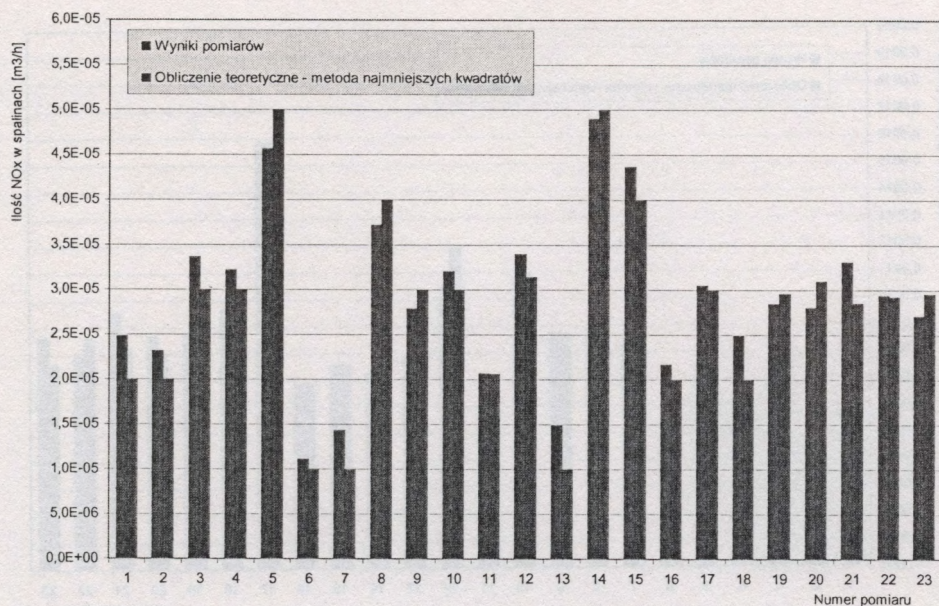
Na rysunkach 4.21 do 4.26 przedstawiono porównanie uzgodnionych wyników pomiarów do obliczonych numerycznie wartości zmiennych zależnych poszczególnych funkcji obiektu: emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz entalpii spalin i części palnych, wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.



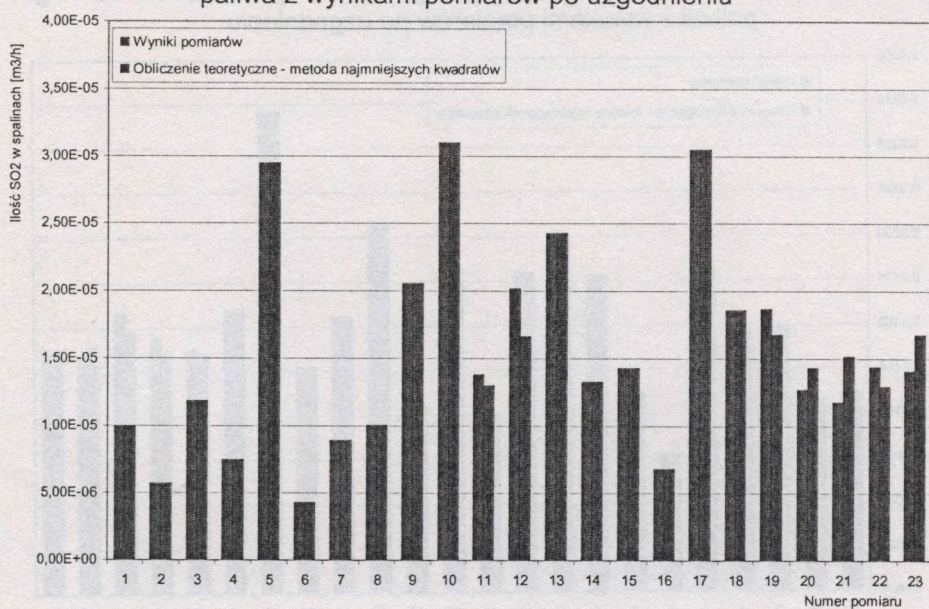
Rys.4.21. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości CO na 1 kg paliwa z wynikami pomiarów po uzgodnieniu



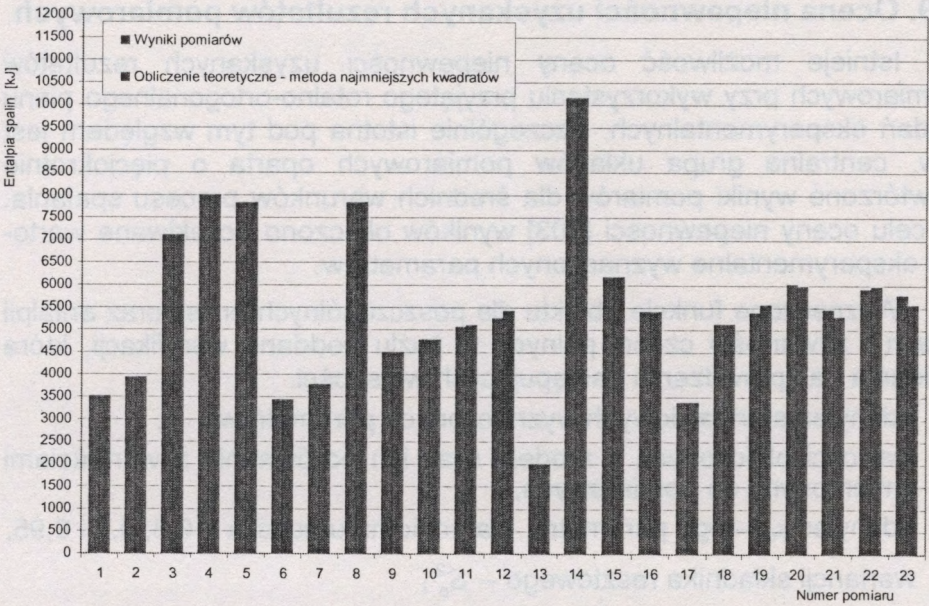
Rys.4.22. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości CO₂ na 1 kg paliwa z wynikami pomiarów po uzgodnieniu



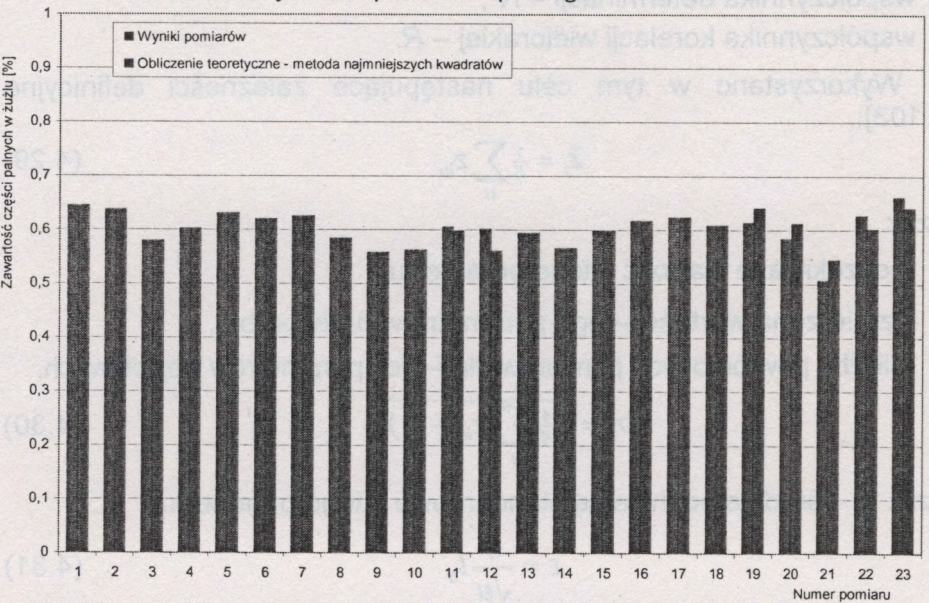
Rys.4.23. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości NO_x na 1 kg paliwa z wynikami pomiarów po uzgodnieniu



Rys.4.24. Porównanie wartości obliczonych jednostkowych ilości SO₂ na 1 kg paliwa z wynikami pomiarów po uzgodnieniu



Rys.4.25. Porównanie wartości obliczonych entalpii spalnin na 1 kg paliwa z wynikami pomiarów po uzgodnieniu



Rys.4.26. Porównanie wartości obliczonych zawartości części lotnych w żużlu na 1 kg paliwa z wynikami pomiarów po uzgodnieniu

4.9. Ocena niepewności uzyskanych rezultatów pomiarowych

Istnieje możliwość oceny niepewności uzyskanych rezultatów pomiarowych przy wykorzystaniu przyjętego rotacyjno-ortogonalnego planu badań eksperymentalnych. Szczególnie istotna pod tym względem jest tzw. centralna grupa układów pomiarowych oparta o pięciokrotnie powtórzone wyniki pomiarów dla średnich warunków procesu spalania. W celu oceny niepewności [103] wyników obliczono oczekiwane wartości eksperymentalne wyznaczonych parametrów.

Wyznaczone funkcje obiektu dla poszczególnych emisji oraz entalpii spalin i zawartości części palnych w żużlu poddano weryfikacji, która polegała na sprawdzeniu następujących własności:

- odchyłeń standardowych wyznaczonych parametrów – σ_i ,
- wartości obliczonych z modelu oraz ich porównaniu z wartościami zmierzonymi do pomiarowych,
- odchyłeń ε_α i -tego parametru, dla poziomu ufności $\alpha = 0,8; 0,9$ i $0,95$,
- wariancji składnika resztowego – S_e^2 ,
- współczynnika zmienności losowej – v_e ,
- współczynnika determinacji – R^2 ,
- współczynnika korelacji wielorakiej – R .

Wykorzystano w tym celu następujące zależności definicyjne [7, 103]:

$$\bar{z}_i = \frac{1}{u} \sum_u z_{iu} \quad (4.29)$$

gdzie:

$\bar{z}_i$ – oczekiwana wartość i -tego parametru,

z_{iu} – zmierzona wartość i -tego parametru w n -tej próbie,

u – liczba powtórzonych pomiarów dla i -tych parametrów wejściowych.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_u (z_{iu} - \bar{z}_i)^2} \quad (4.30)$$

gdzie: σ_i – średnie odchylenie standardowe i -tego parametru,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{u}} t_\alpha \quad (4.31)$$

gdzie:

ε – odchylenie i -tego parametru, odpowiadające poziomowi ufności α ,

t_α – zredukowana zmienna losowa według [103].

Podstawowych informacji na temat zgodności modelu z danymi empirycznymi dostarczają: wariacja składnika resztowego oraz błędy szacunku modelu.

Wariancję składnika resztowego wyznaczono ze wzoru:

$$S_e^2 = \frac{\sum e_t^2}{n - k - 1} \quad (4.32)$$

Wariancja składnika resztowego oraz odchylenie standardowe dla każdej uzyskanej funkcji obiektu wynosi:

$$S_e = \sqrt{S_e^2} \quad (4.33)$$

gdzie:

n – liczba obserwacji (23),

k – liczba zmiennych losowych (5),

e – składnik resztowy.

Dopasowanie wyznaczonych funkcji obiektu poddano ocenie za pomocą współczynnika zmiennej losowej, opartej o odchylenie standardowe reszt:

$$V_e = \frac{S_e}{\bar{z}_i} \quad (4.34)$$

Weryfikację przeprowadzono również za pomocą współczynnika determinacji R^2 określającego, w jakim stopniu wyznaczone funkcje obiektu badań zostały wyjaśnione przez opisujące go zmienne:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{z}_i - \bar{z}_i)^2}{\sum_{t=1}^n (z_i - \bar{z}_i)^2} \quad (4.35)$$

gdzie:

$\bar{z}_i$ – wartość średnia zależnej zmiennej wyjściowej,

$\hat{z}_i$ – obliczona z modelu wartość z odpowiadająca t -temu układowi zmiennych niezależnych,

z_i – zmierzona wartość z odpowiadająca t -temu układowi zmiennych niezależnych.

Im wartość R^2 wyższa (w przedziale od 0 do 1), tym model jest bardziej wyjaśniony przez opisujące go zmienne.

O sile związku zmiennej [7] objaśnianej ze wszystkimi zmiennymi objaśniającymi świadczy współczynnik korelacji wielorakiej:

$$R = \sqrt{R^2} \quad (4.36)$$

Odchylenia standardowe σ , odchylenia ε dla $\alpha = 0,8; 0,9$ i $0,95$, wariancja składnika resztowego S_e^2 , współczynniki zmienności losowej v_e , współczynniki determinacji R^2 , współczynniki korelacji wielorakiej R dla poszczególnych funkcji obiektu dla emisji CO, CO₂, NO_x, SO₂, oraz entalpii spalin i części palnych w żużlu

Tabela 4.14

Lp.	Emisja CO	Emisja CO ₂	Emisja NO _x	Emisja SO ₂	Entalpia spalin	Części palne
$\bar{Z}_i$	23,53120	608,08000	0,84624	0,88366	5716,90422	0,59924
σ_i	1,93976	28,07048	0,02512	0,10331	282,42187	0,05825
$\varepsilon_{\alpha=0,95}$	0,81630	11,81284	0,01057	0,04347	118,85103	0,02452
$\varepsilon_{\alpha=0,9}$	1,84948	26,76407	0,02395	0,09850	269,27778	0,05554
$\varepsilon_{\alpha=0,8}$	3,99390	57,79632	0,05173	0,21270	581,49855	0,11994
S_e^2	2,03627	421,61998	0,00087	0,00581	6447,5058	0,00013
S_e	1,42698	20,53339	0,02944	0,07623	80,29636	0,01144
V_e	0,06064	0,03377	0,03479	0,08627	0,01405	0,01910
R^2	0,68086	0,45389	0,91347	0,95750	0,92191	0,95271
R	0,82514	0,67371	0,95575	0,97852	0,96016	0,97607

Uzyskane wyniki współczynników (tabela 4.14) pokazują, iż opracowane modele są dobrze wyjaśnione przez opisujące je zmienne, o czym świadczą wartości współczynnika determinacji R^2 . Przeprowadzone sprawdziany wykazały zgodność zbudowanych modeli z danymi pomiarowymi.

5. Użyteczność procesu współspalania

Użyteczność procesu współspalania węgla z gumą może być oceniana w aspekcie zagospodarowania odpadów (im mniej odpadów, tym lepiej), efektów ekologicznych (im mniej emisji substancji szkodliwych, tym lepiej), energetycznych (im większy uzyskany użyteczny efekt energetyczny, np. ciepło, tym lepiej). Każde z tych kryteriów prowadzić może do uzyskania innego wariantu optymalnego, co determinuje uzyskanie innego rozwiązania optymalnego.

Efekt, który pozwala pogodzić wszystkie powyższe kryteria powinien mieć charakter ekonomiczny. Głównym problemem w tym przypadku jest przyjęcie reprezentatywnych parametrów ekonomicznych.

5.1. Ekonomiczne kryterium użyteczności współspalania

Dla oceny użyteczności współspalania zastosowano kryterium kosztów, czyli sumę kosztów paliwa i kosztów środowiskowych:

$$K = K_{pal.} + K_{środ.} + K_{skłk} \quad (5.1)$$

gdzie:

K – sumaryczny koszt uzyskanego nośnika energetycznego,

$K_{pal.}$ – koszt paliwa (węgla i gumy) z uwzględnieniem ewentualnych kosztów składowania gumy,

$K_{środ.}$ – koszt użytkowania opłat środowiskowych.

W analizie kryterium kosztów przyjęto założenie, że badania prowadzone są dla stałego efektu użytecznego procesu spalania rozumianego jako nadwyżka entalpii spalin [2] ponad parametry otoczenia. Przy stałej temperaturze spalin wylotowych z komory powyższa nadwyżka jest proporcjonalna do strumienia spalin.

5.1.1. Ocena kosztów paliwa

Koszty mieszanki paliwowej są wyrażone sumą iloczynów kosztów paliw składowych (węgiel kamienny, guma z opon samochodów osobowych) oraz ich udziałów:

$$K_{pal.} = P_w k_w + P_g k_g \quad (5.2)$$

gdzie:

P_w – strumień spalanego węgla,

P_g – strumień spalanej gumy,

k_w – koszt (cena) węgla loco-kocioł energetyczny,

k_g – koszt rozdrobnionych opon gumowych z uwzględnieniem nie poniesionych kosztów składowania.

Między P_w i P_g występuje następująca zależność:

$$P_w = (1 - x_1)P \quad (5.3)$$

$$P_g = x_1 \cdot P \quad (5.4)$$

gdzie: P – sumaryczna ilość paliwa

5.1.2. Ocena kosztów środowiskowych

Koszty środowiskowe w przeliczeniu na 1 kg paliwa wyrażone są jako suma iloczynów udziałów i opłat za poszczególne emisje, wymnożone dodatkowo przez ilość paliwa:

$$K_{środ.} = P (V_{CO_2} k_{CO_2} + V_{NO_x} k_{NO_x} + V_{CO} k_{CO} + V_{SO_2} k_{SO_2}) \quad (5.5)$$

gdzie:

V_{CO_2} , V_{CO} , V_{NO_x} , V_{SO_2} – jednostkowa ilość wyemitowanego CO, CO₂, NO_x, SO₂, odniesiona do 1 kg paliwa, kmol/kg,

k_{CO_2} , k_{CO} , k_{NO_x} , k_{SO_2} – ceny opłat za emisję CO, CO₂, NO_x, SO₂.

Orientacyjne ceny za emisję podano w tabeli 5.1. V_{CO_2} , V_{CO} , V_{NO_x} , V_{SO_2} zależą od warunków realizacji procesu spalania. Ocena tego wpływu zostanie omówiona w punkcie 5.4.

Ceny opłat za emisję substancji szkodliwych

Tabela 5.1

Lp.	Emisja	Cena w zł/kg
1	CO	0,11
2	CO ₂	0,00024
3	NO	0,44
4	SO ₂	0,44

5.2. Określenie ilości zużytego paliwa

1. Ilość zużytego paliwa zależy od przyjętej wartości stałego efektu użytecznego:

$$P = \frac{Q}{V_s \cdot \Delta t_s} = \frac{Q}{\Delta I} \quad (5.6)$$

przy czym:

Q – założony stały efekt użyteczny

Δt_s – nadwyżka temperatury spalin ponad temperaturę otoczenia.

V_s – ilość spalin uzyskana do jednostki paliwa

Wartości liczbowe zależą od warunków realizacji procesu spalania.

5.3. Koszt paliwa

W tabeli 5.2 przedstawione zostały ceny paliw i odpadów przyjęte do dalszych obliczeń.

Ceny paliw i odpadów zastosowanych w badaniach

Tabela 5.2

Lp.	Paliwo	Koszt PLN/kg
1	Węgiel kamienny	0,410
2	Guma z opon samochodowych	0,360

W tabeli 5.3 zestawiono koszty mieszanek paliwowych węgla z gumą z opon pojazdów ciężarowych w przedziale od 0 do 10% udziału masowego gumy (oraz 100% gumy).

Koszt paliwa potrzebny do wytworzenia stałego efektu użytecznego (1MJ)

Tabela 5.3

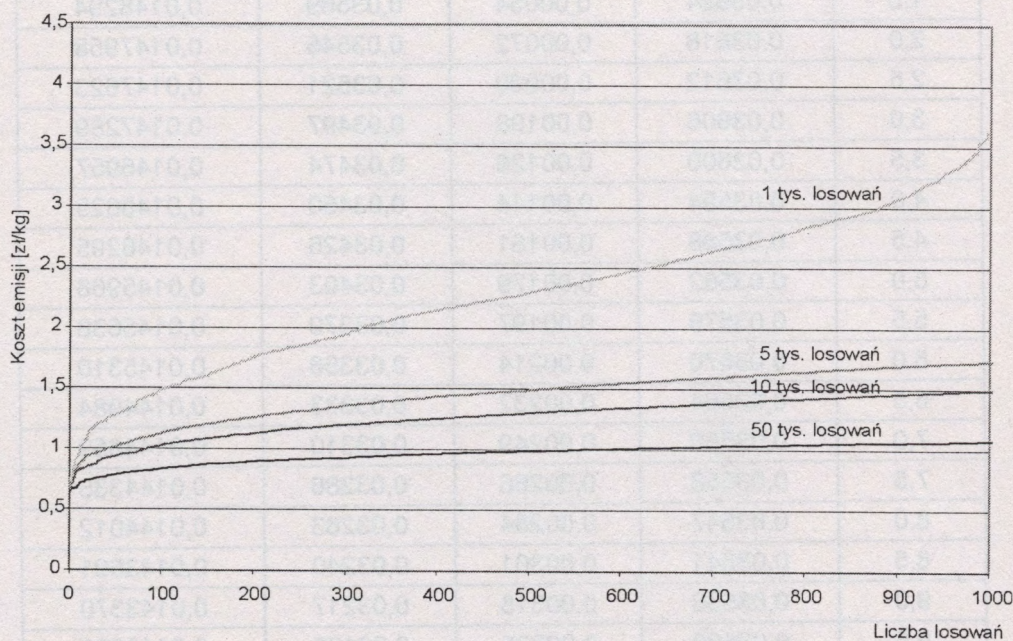
Udział gumy w paliwie	kg paliwa/MJ	kg gumy/MJ	kg węgla/MJ	koszt paliwa /MJ
[%]	[kg]	[kg]	[kg]	[PLN]
0,0	0,03642	0,00000	0,03642	0,0149308
0,5	0,03636	0,00018	0,03617	0,0148969
1,0	0,03630	0,00036	0,03593	0,0148631
1,5	0,03624	0,00054	0,03569	0,0148294
2,0	0,03618	0,00072	0,03545	0,0147958
2,5	0,03612	0,00090	0,03521	0,0147623
3,0	0,03606	0,00108	0,03497	0,0147289
3,5	0,03600	0,00126	0,03474	0,0146957
4,0	0,03594	0,00144	0,03450	0,0146625
4,5	0,03588	0,00161	0,03426	0,0146295
5,0	0,03582	0,00179	0,03403	0,0145966
5,5	0,03576	0,00197	0,03379	0,0145638
6,0	0,03570	0,00214	0,03356	0,0145310
6,5	0,03564	0,00232	0,03333	0,0144984
7,0	0,03559	0,00249	0,03310	0,0144659
7,5	0,03553	0,00266	0,03286	0,0144335
8,0	0,03547	0,00284	0,03263	0,0144012
8,5	0,03541	0,00301	0,03240	0,0143691
9,0	0,03536	0,00318	0,03217	0,0143370
9,5	0,03530	0,00335	0,03195	0,0143050
10,0	0,03524	0,00352	0,03172	0,0142731
100,0	0,02731	0,02731	0,00000	0,0098334

5.4. Koszt środowiskowy

Celem przeprowadzonej optymalizacji jest określenie optymalnych parametrów wejściowych x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ze względu na minimum kosztów uzyskania określonego efektu użytecznego (zakres ich zmienności określono w tabeli 4.3).

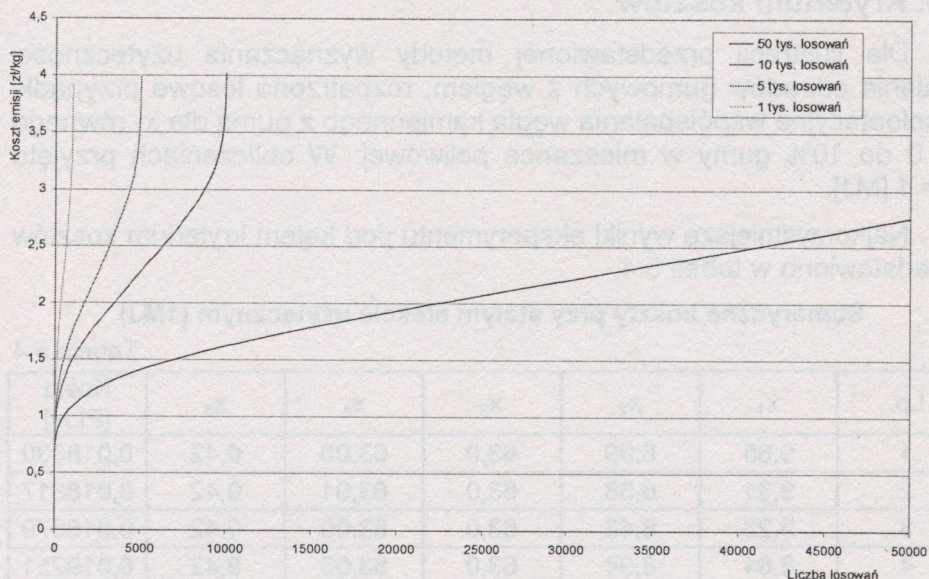
Do rozwiązania powyższego problemu została zastosowana metoda Monte Carlo. Wykorzystując generator liczb losowych przeprowadzono serię losowań, składającą się z p powtórzeń. Wartości maksymalne i minimalne losowanych zmiennych były założone wcześniej i przedstawione w tabeli 4.3. Uzyskane rozwiązanie jest tym bardziej reprezentatywne, im większa liczba serii powtórzeń.

W dostępnej literaturze brak przesłanek dotyczących doboru serii losowań. Dla oceny wpływu liczby losowań, przeprowadzono ich cztery serie: 1 tys., 5 tys., 10 tys. oraz 50 tys. losowań. Zastosowanie dużej liczby losowań (powyżej 10 tys.) powoduje znacznie dokładniejsze wyznaczenie poszukiwanej wartości optymalnej. Rysunki 5.1 oraz 5.2 obrazują wpływ liczby losowań na wyznaczenie poszukiwanych wartości.



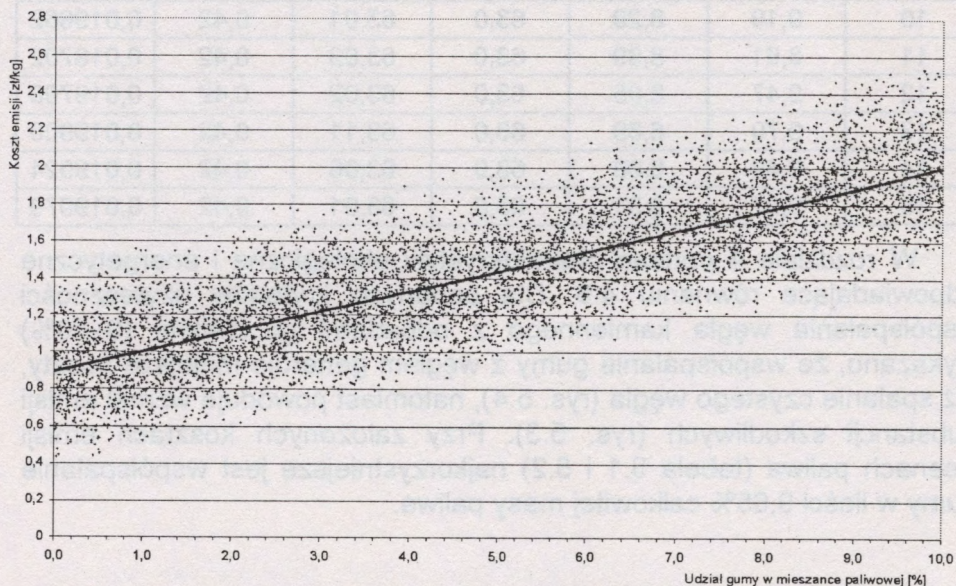
Rys.5.1. Wpływ liczby losowań na zakres zmienności 1000 najkorzystniejszych wyników kosztów emisji substancji szkodliwych

Koszt sumarycznej emisji CO , CO_2 , NO_x , SO_2 dla losowo wybranych danych wejściowych x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 z wykorzystaniem metody Monte Carlo został przedstawiony na rysunku 5.3.



Rys.5.2. Wpływ liczby losowań na zakres najniższych kosztów emisji

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem parametru x_1 (zawartość gumy w mieszance), dla losowo wybranych parametrów x_2 do x_5 , koszt emisji składników szkodliwych wzrasta.



Rys.5.3. Koszt sumarycznej emisji CO , CO_2 , NO_x , SO_2 dla losowo wybranych danych wejściowych x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 z wykorzystaniem metody Monte Carlo

5.5. Kryterium kosztów

Dla ilustracji przedstawionej metody wyznaczania użyteczności spalania odpadów gumowych z węglem, rozpatrzono losowe przypadki eksploatacyjne współspalania węgla kamiennego z gumą dla x_1 równego od 0 do 10% gumy w mieszance paliwowej. W obliczeniach przyjęto $Q = 1$ [MJ].

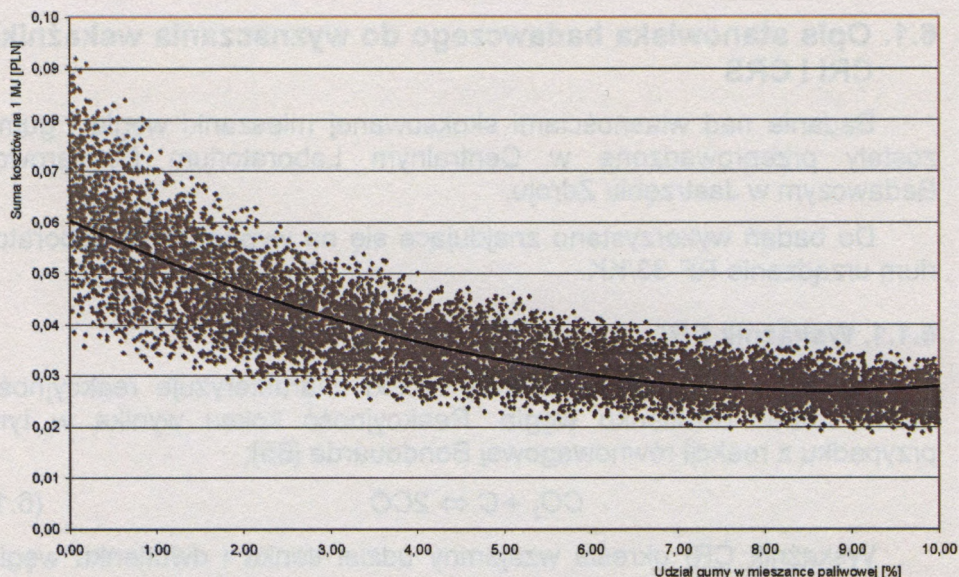
Najkorzystniejsze wyniki eksperymentu pod kątem kryterium kosztów przedstawiono w tabeli 5.4.

Sumaryczne koszty przy stałym efekcie użytecznym (1MJ)

Tabela 5.4

Lp.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Koszt [PLN]
1	9,65	8,99	63,0	63,00	0,42	0,018330
2	9,81	8,38	63,0	63,01	0,42	0,018817
3	9,23	8,46	63,0	63,00	0,42	0,018879
4	8,64	8,94	63,0	63,03	0,42	0,019251
5	9,90	8,73	63,0	63,06	0,42	0,019256
6	9,69	8,62	63,0	63,03	0,42	0,019435
7	9,65	8,99	63,0	63,10	0,42	0,019598
8	9,01	8,85	63,0	63,02	0,42	0,019605
9	9,88	8,42	63,0	63,01	0,41	0,019649
10	9,19	8,29	63,0	63,01	0,42	0,019662
11	8,61	8,99	63,0	63,03	0,42	0,019702
12	9,47	8,05	63,0	63,02	0,42	0,019790
13	9,70	8,69	63,0	63,11	0,42	0,019900
14	8,49	8,68	63,0	63,06	0,42	0,019924
15	8,97	8,31	63,0	63,01	0,42	0,019979

W rozdziale 4 podano charakterystyki ekologiczne i energetyczne odpowiadające równaniu 4.6. Dla podanych kryteriów użyteczności współspalania węgla kamiennego z odpadami gumowymi (0–10%) wykazano, że współspalanie gumy z węglem generuje mniejsze koszty, niż spalanie czystego węgla (rys. 5.4), natomiast powoduje wzrost emisji substancji szkodliwych (rys. 5.3). Przy założonych kosztach emisji i cenach paliwa (tabela 5.1 i 5.2) najkorzystniejsze jest współspalanie gumy w ilości 9,65% całkowitej masy paliwa.



Rys.5.4. Sumaryczny koszt wytworzenia 1MJ energii dla losowo wybranych mieszanin przy udziale od 0% do 10% gumy z wykorzystaniem metody Monte Carlo

6. Badania własności reakcyjnych mieszanek węglowo-gumowych

Jedną z korzystniejszych właściwości odpadów gumowych jest wykazywana przez gumę reaktywność [37] (własność redukcyjna). Sprzyja ona zastosowaniu odpadów gumowych w procesach technologicznych, często związanych z równoczesnym ich spalaniem.

Niniejszy rozdział pracy poświęcono badaniom nad określeniem wpływu udziału gumy na własności reakcyjne skoksowanych mieszanek węglowo-gumowych oraz ich wytrzymałości mechanicznej.

Reaktywność substancji zawierających węgiel pierwiastkowy (np. koksu) określa ich zdolność do reagowania z tlenem, dwutlenkiem węgla lub parą wodną w ściśle określonych warunkach (ciśnienie i temperatura). W wyniku reakcji rośnie zawartość tlenku węgla oraz równocześnie maleje masa badanej substancji.

Za miarę reaktywności koksu zwykło się uważać stosowany w hutnictwie wskaźnik CRI (coke reactivity index). Wytrzymałość mechaniczną koksu ocenia się zazwyczaj [51] według wskaźnika CRS (coke strength after reaction).

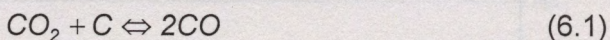
6.1. Opis stanowiska badawczego do wyznaczania wskaźnika CRI i CRS

Badania nad własnościami skoksowanej mieszanki węgla i gumy zostały przeprowadzone w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym w Jastrzębiu Zdroju.

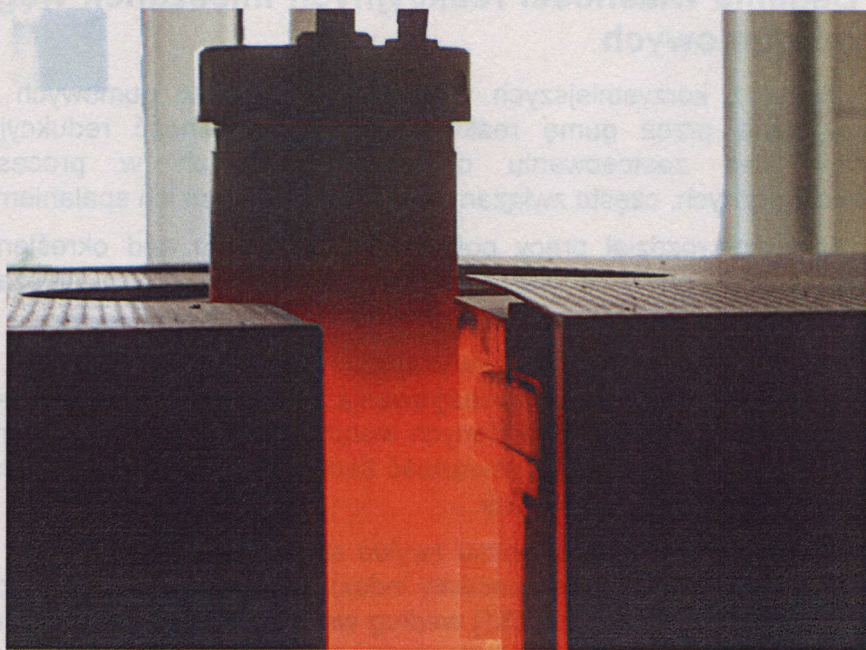
Do badań wykorzystano znajdujące się na wyposażeniu Laboratorium urządzenie RF-33/KK.

6.1.1. Wskaźnik CRI

Wskaźnik CRI (coke reactivity index) charakteryzuje reakcyjność koksu wobec dwutlenku węgla. Reakcyjność koksu wynika w tym przypadku z reakcji równowagowej Bondouarda [65]:



Wskaźnik CRI określa wzajemny udział tlenku i dwutlenku węgla współistniejących w układzie faza gazowa – faza stała dla konkretnych warunków (temperatury i ciśnienia). W niskich temperaturach przeważa tworzenie się dwutlenku węgla, w wysokich zaś tlenku węgla. Oznacza się go na podstawie ubytku masy koksu podczas jego reakcji z dwutlenkiem węgla w temperaturze 1100°C przy ciśnieniu atmosferycznym, w czasie 2 godzin.



Rys.6.1. Retorta z załadowanym koksem tuż po zakończeniu wyznaczania wskaźnika CRI

6.1.2. Wskaźnik CSR

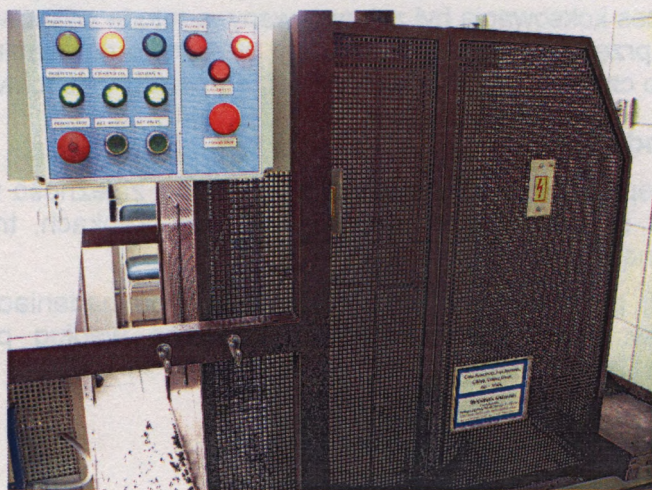
Wskaźnik CRS (coke strength after reaction) charakteryzuje zmiany wytrzymałości koksu po badaniu reakcyjności. Jego wartość określa się po oznaczeniu procentowym masy ziaren o wielkości powyżej 10 mm pozostałych po poddaniu próbki zgazowanego koksu obróbce mechanicznej w urządzeniu do bębnowania – rysunek 6.2.



Rys.6.2. Urządzenie do bębnowania próbki koksu po badaniu reakcyjności

6.1.3. Stanowisko do wyznaczania wskaźnika CRI

Urządzenie RF-33/KK (rys. 6.3) do wyznaczenia wskaźnika reakcyjności wobec dwutlenku węgla (CRI) jest zbudowane z trzech podsta-



Rys.6.3. Stanowisko do wyznaczenia wskaźnika reakcyjności wobec dwutlenku węgla (CRI)

wowych elementów: pieca elektrycznego składającego się z dwóch symetrycznych, stykających się w płaszczyźnie pionowej połówek wraz z zestawem retort (rys. 6.1), wagi precyzyjnej oraz stanowiska komputerowego sterującego całością. Schemat technologiczny urządzenia RF-33/KK do wyznaczania wskaźnika reakcyjności wobec dwutlenku węgla został przedstawiony na rysunku 6.3.

6.1.4. Przygotowanie próbek

Węgiel został wstępnie zmielony w młynku ślimakowym, a następnie przesiany na sicie mechanicznym do klasy ziarnowej 3–0 mm. Rozdrobniona guma z opon samochodowych została przesiana do klasy ziarnowej 2,5–0,5 mm.

Następnie przygotowane zostały mieszaniny węgla kamiennego z gumą zgodnie z tabelą 6.1, z których przygotowano dziesięć 5 kg próbek. Każdą próbkę po podzieleniu na pięć części, wsypywano do retorty porcjami, a następnie każdą porcję ubijano specjalnym drażkiem tworząc warstwę o tej samej w przybliżeniu gęstości. Gęstość warstwy oceniano poprzez śledzenie głębokości wprowadzania drażka ubijaka do retorty.

6.1.5. Koksowanie mieszanki

Przygotowaną retortę ze wsadem wkładano do zimnego pieca. Po zbliżeniu ścianek pieca do retorty następowało ich intensywne rozgrzewanie. Po około 20 minutach ścianki pieca osiągały temperaturę zbliżoną do około 600°C, a po 80 minutach do 850°C. W czasie koksowania temperatura wewnątrz wsadu była stale kontrolowana. Gdy powstająca bryła koksu osiągnęła w swej środkowej części temperaturę 950°C, co następowało w czasie 160–180 minut od momentu rozpoczęcia ogrzewania retorty, proces koksowania był zatrzymywany, a retortę wyjmowano z pieca. Następnie przez retortę przepuszczany był azot o natężeniu przepływu 10 l/min, do czasu uzyskania przez koks temperatury pokojowej.

6.1.6. Metoda badania

W przeprowadzonych badaniach określono zależność wskaźników CRI i CRS od zawartości gumy w badanych próbkach, traktowanych jako zmienną niezależną.

W [49] proponuje się określać w tego typu badaniach standaryzowane tzw. wewnętrzne zmienne niezależne według pierwiastków wielomianu Czebyszewa:

$$\hat{x}_j = \cos \frac{\pi(2 \cdot j - 1)}{2 \cdot k} \quad (6.2)$$

gdzie:

k – liczba punktów wewnętrznych,

j – numer kolejnego punktu wewnętrznego ($j = 1, \dots, 5$).

Poza punktami wewnętrznymi w badaniach uwzględniono dodatkowe wartości maksymalne i minimalne parametrów zmiennych niezależnych.

6.1.7. Wyznaczenie punktów pomiarowych

Do badań przygotowano próbki znajdujące się w tabeli 6.1, które są zgodne z zasadą przeprowadzania eksperymentu i gwarantują najlepszą reprezentatywność wyników przeprowadzonej analizy. Poniższe punkty pomiarowe odpowiadają pierwiastkom tzw. wielomianu Czebyszewa.

Założono wstępnie 5 punktów pomiarowych, a dodatkowo zmierzono wartości maksymalne i minimalne.

W tabeli 6.1 przedstawiono ilości masowe mieszaniny węgla z gumą dla poszczególnych punktów pomiarowych. Pomiar nr 3 jako wartość średnia został powtórzony 5 razy dla analizy statystycznej.

Rozkład punktów pomiarowych z wykorzystaniem pierwiastków wielomianów Czebyszewa oraz zakładanych wartości minimalnej i maksymalnej

Tabela 6.1

Punkt pomiarowy	$\hat{X}_k$	Zawartość gumy $Z_g[\%]$	Węgiel [kg]	Guma [kg]
max	1,00000	10,00	4,5000	0,5000
1	0,95106	9,75	4,5122	0,4878
2	0,58779	7,93	4,6031	0,3969
3	0,00000	5,00	4,7500	0,2500
4	-0,58779	2,06	4,8969	0,1031
5	-0,95106	0,24	4,9878	0,0122
min	-1,00000	0,00	5,0000	0,0000

6.2. Wyniki badań własności reakcyjnych i wytrzymałościowych koks

Pierwsze próby przeprowadzono przy użyciu węgla energetycznego. Nie dały one oczekiwanych wyników, gdyż mieszanina węgla energetycznego z gumą dała koks syпки nie nadający się do badań własności reakcyjnych, a zwłaszcza wytrzymałościowych – rysunek 6.5.

W kolejnych pomiarach zastosowano więc węgiel koksowy typu 35 z KWK Zofiówka o następujących parametrach: zawartość popiołu $A_d = 7,07\%$, wilgoć całkowita $W_{tr} = 10,0\%$, części lotne $V_{daf} = 24,4\%$.

Węgiel ten umożliwił skoksowanie mieszaniny węgla z gumą i w całym przedziale od 0 do 10% dodatku gumy nie wykazywał tendencji do rozkruszania się (rys. 6.4).



Rys.6.4. Próba nie nadająca się do oznaczenia wskaźnika reakcyjności



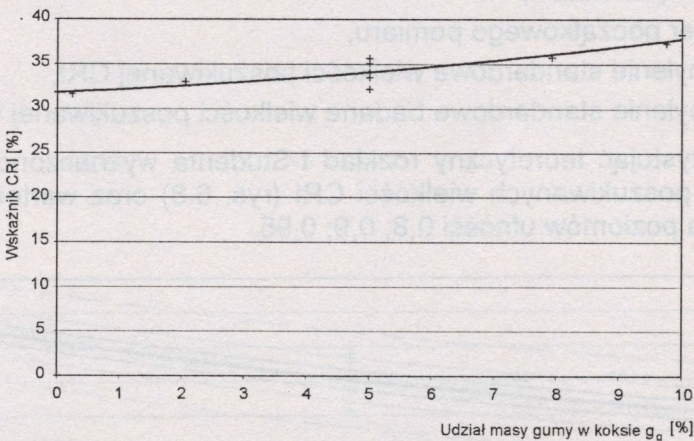
Rys.6.5. Koks z 5% zawartością gumy

Na rysunku 6.5 przedstawiono próbkę koksu, do którego wytworzenia wykorzystano mieszaninę węgla z 5% dodatkiem gumy. Ciemniejsze plamki przedstawiają skoksowaną gumę. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 6.2 oraz na rysunkach 6.6 i 6.7.

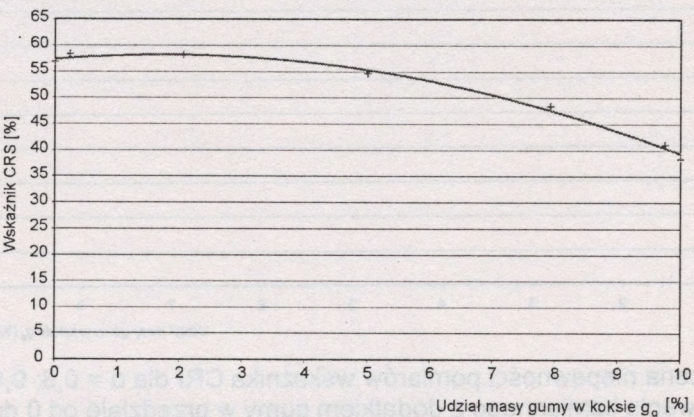
Wyniki dla punktów pomiarowych z wykorzystaniem wielomianów Czebyszewa oraz zakładanych wartości minimalnej i maksymalnej

Tabela 6.2

Pomiar	Zawartość gumy, [%]	CRI, [%]	CRS, [%]
1	0	31,8	56,8
2	0,24	31,6	58,3
3	2,06	33,4	58,2
4	5	35,1	56,3
5	5	32,2	56,5
6	5	33,5	54,9
7	5	35,6	50,9
8	5	34,0	54,7
9	7,93	35,7	48,5
10	9,75	37,3	41,1
11	10	37,9	40,5



Rys.6.6. Wyniki wskaźników CRI dla mieszanin węgla kamiennego z dodatkiem gumy w przedziale od 0 do 10% dodatku gumowego



Rys.6.7. Wyniki wskaźników CRS dla mieszanin węgla kamiennego z dodatkiem gumy w przedziale od 0 do 10% dodatku gumowego

6.3. Ocena niepewności wyników

Wykorzystując powtórzone pomiary dla średniej zawartości gumy w koksowanej mieszance (5%) określono wartość oczekiwaną oraz odchylenia:

$$\overline{CRI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CRI)_i \quad (6.3)$$

$$\sigma_{CRI} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i [(CRI)_i - \overline{CRI}]^2} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{CRS} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i [(CRS)_i - \overline{CRS}]^2} \quad (6.5)$$

gdzie:

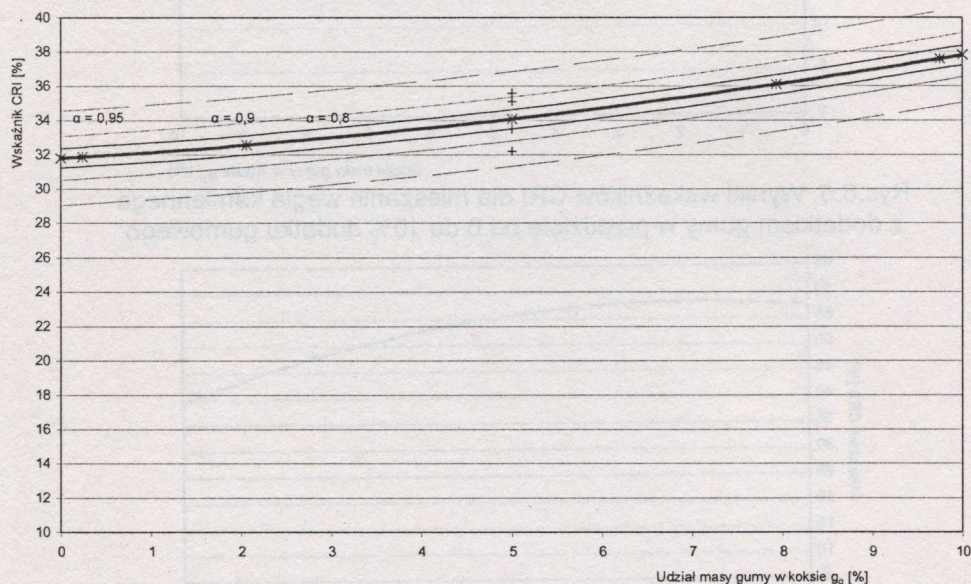
n – liczba powtórzeń,

i – numer początkowego pomiaru,

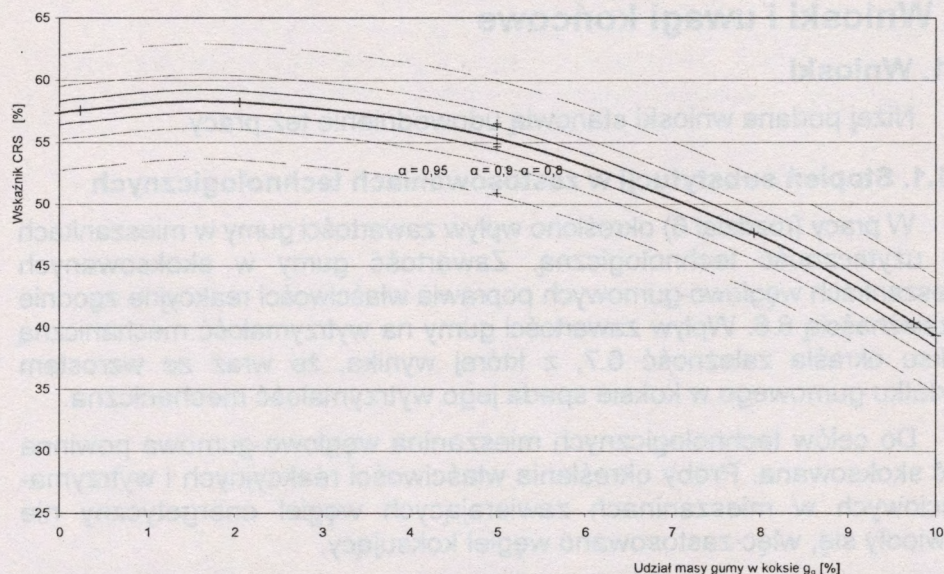
σ_{CRI} – odchylenie standardowe wielkości poszukiwanej CRI,

σ_{CRS} – odchylenie standardowe badane wielkości poszukiwanej CRS.

Wykorzystując teoretyczny rozkład t-Studenta wyznaczono zakres zmienności poszukiwanych wielkości CRI (rys. 6.8) oraz wartości CRS (rys. 6.9) dla poziomów ufności 0,8; 0,9; 0,95.



Rys.6.8. Ocena niepewności pomiarów wskaźnika CRI dla $\alpha = 0,8; 0,9; 0,95$ mieszanin węgla kamiennego z dodatkiem gumy w przedziale od 0 do 10% dodatku gumowego



Rys.6.9. Ocena niepewności pomiarów wskaźnika CRS dla $\alpha = 0,8; 0,9; 0,95$ mieszanin węgla kamiennego z dodatkiem gumy w przedziale od 0 do 10% dodatku gumowego

6.4. Ocena analitycznych postaci CRI i CRS

Wyniki pomiarów wskazują jednoznacznie, że wraz ze wzrostem dodatku gumowego w koksie wzrastają własności reakcyjne koksu (rys. 6.6), lecz spada wytrzymałość koksu (rys. 6.7). Zjawisko to opisują następujące równania:

- właściwości reakcyjne koksu:

$$CRI = 0,0291 x_1^2 + 0,3101 x_1 + 31,8017 \quad (6.6)$$

- wytrzymałość koksu:

$$CRS = -0,279 x_1^2 + 0,9897 x_1 + 57,353 \quad (6.7)$$

Badania dotyczącego superpozycji nie udało się przeprowadzić ze względu na trudności z wynikami CRI i CRS dla czystej gumy, ponieważ mogłoby to doprowadzić do awarii urządzenia RF-33/KK.

Zastosowanie odpadu gumowego jako paliwa do produkcji koksu ogranicza degradację środowiska naturalnego poprzez zmniejszenie wydobycia surowców mineralnych.

W trakcie spalania koksu zawierającego gumę, a więc zwiększoną ilość chloru (działanie mikrododatków) ulega on wtórnej emisji (reemisji) w stopniu zależnym głównie od warunków procesu spalania.

7. Wnioski i uwagi końcowe

7.1. Wnioski

Niżej podane wnioski stanowią udowodnienie tez pracy.

7.1.1. Stopień substytucji w zastosowaniach technologicznych

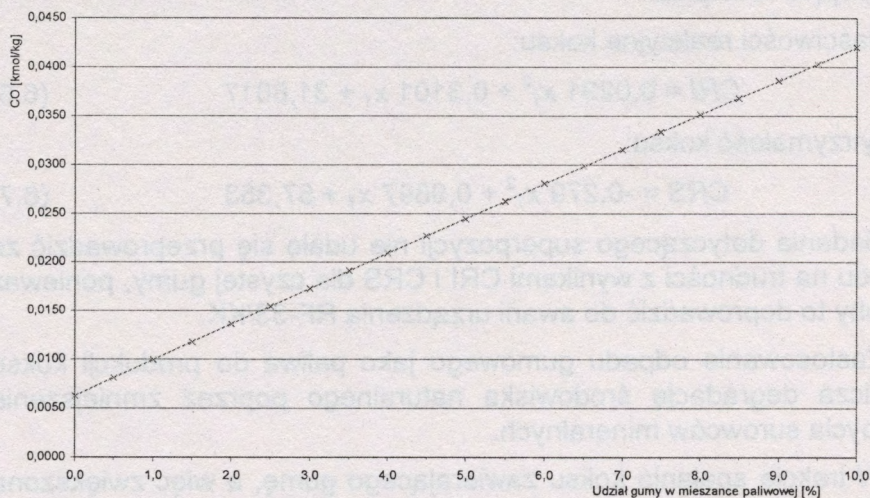
W pracy (rozdział 6) określono wpływ zawartości gumy w mieszankach na użyteczność technologiczną. Zawartość gumy w skoksowanych mieszankach węglowo-gumowych poprawia właściwości reakcyjne zgodnie z zależnością 6.6. Wpływ zawartości gumy na wytrzymałość mechaniczną koksu określa zależność 6.7, z której wynika, że wraz ze wzrostem dodatku gumowego w koksie spada jego wytrzymałość mechaniczna.

Do celów technologicznych mieszanina węglowo-gumowa powinna być skoksowana. Próby określenia właściwości reakcyjnych i wytrzymałościowych w mieszaninach zawierających węgiel energetyczny nie powiodły się, więc zastosowano węgiel koksujący.

7.1.2. Wpływ warunków spalania na efekty energetyczne i ekologiczne

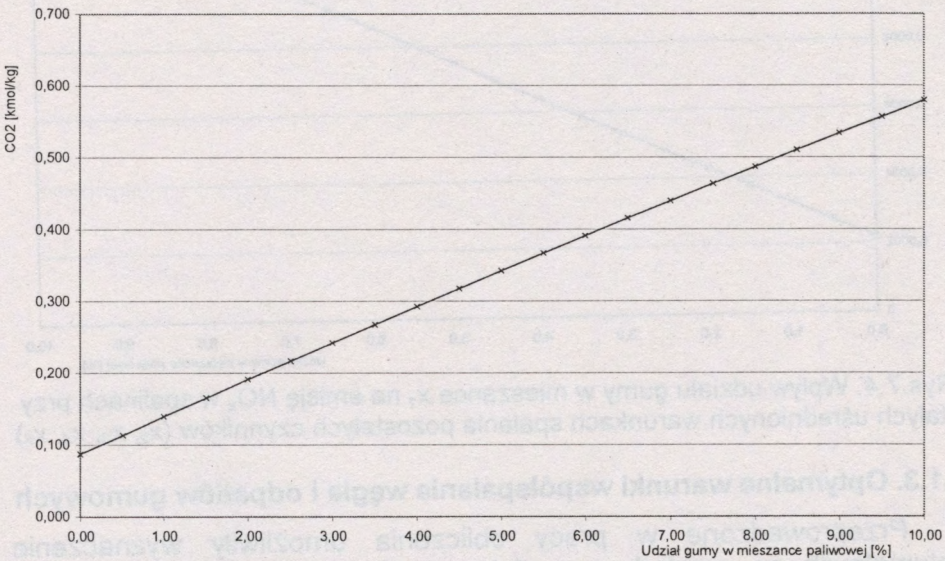
Badania przeprowadzone w pracy umożliwiły wyznaczenie charakterystyk ekologicznych i energetycznych (tabela 4.13) współspalania węgla kamiennego i odpadów gumowych w zależności od warunków przeprowadzania tego procesu (tabela 4.3 i 4.5).

Wpływ warunku x_1 spalania na efekty ekologiczne i energetyczne przedstawiają rysunki od 7.1 do 7.4.

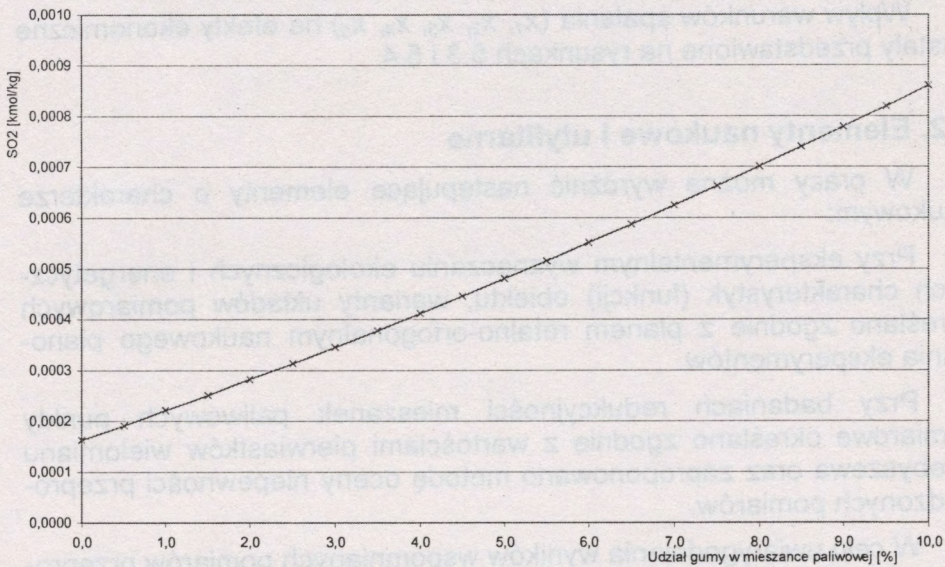


Rys.7.1. Wpływ udziału gumy w mieszance x_1 na emisję CO w spalinach przy stałych uśrednionych warunkach spalania pozostałych czynników (x_2 , x_3 , x_4 , x_5)

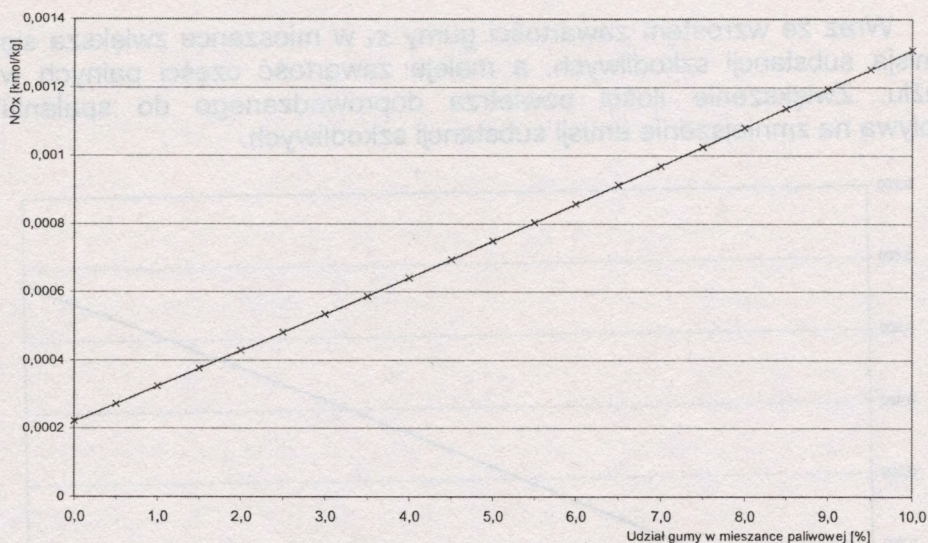
Wraz ze wzrostem zawartości gumy x_1 w mieszance zwiększa się emisja substancji szkodliwych, a maleje zawartość części palnych w żużlu. Zwiększenie ilości powietrza doprowadzanego do spalania wpływa na zmniejszenie emisji substancji szkodliwych.



Rys.7.2. Wpływ udziału gumy w mieszance x_1 na emisję CO_2 w spalinach przy stałych uśrednionych warunkach spalania pozostałych czynników (x_2, x_3, x_4, x_5)



Rys.7.3. Wpływ udziału gumy w mieszance x_1 na emisję SO_2 w spalinach przy stałych uśrednionych warunkach spalania pozostałych czynników (x_2, x_3, x_4, x_5)



Rys.7.4. Wpływ udziału gumy w mieszance x_1 na emisję NO_x w spalinach przy stałych uśrednionych warunkach spalania pozostałych czynników (x_2, x_3, x_4, x_5)

7.1.3. Optymalne warunki współspalania węgla i odpadów gumowych

Przeprowadzone w pracy obliczenia umożliwiły wyznaczenie optymalnych ze względu na efektywność współspalania warunków spalania węgla kamiennego i odpadów gumowych. Wyniki tych obliczeń zostały zamieszczone w punkcie 5.5 (tabela 5.4).

Wpływ warunków spalania (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) na efekty ekonomiczne zostały przedstawione na rysunkach 5.3 i 5.4.

7.2. Elementy naukowe i użytkowe

W pracy można wyróżnić następujące elementy o charakterze naukowym:

Przy eksperymentalnym wyznaczaniu ekologicznych i energetycznych charakterystyk (funkcji) obiektu, warianty układów pomiarowych określano zgodnie z planem rotacyjno-ortogonalnym naukowego planowania eksperymentów.

Przy badaniach redukcyjności mieszanek paliwowych punkty pomiarowe określano zgodnie z wartościami pierwiastków wielomianu Czebyszewa oraz zaproponowano metodę oceny niepewności przeprowadzonych pomiarów.

W celu uwiarygodnienia wyników wspomnianych pomiarów przeprowadzono ich uzgadnianie z wykorzystaniem zasad rachunku wyrównawczego.

W oparciu o informacje literaturowe opracowano koncepcję i wybudowano stanowisko badawcze do wyznaczania charakterystyk energetycznych i ekologicznych, symulujące komorę spalania kotła rusztowego, w której realizowany jest proces współspalania węgla i odpadów gumowych.

Zaproponowano metodę wyznaczania najkorzystniejszych parametrów eksploatacyjnych procesu spalania mieszanek paliwowych.

Utylitarne znaczenie mają, jak się wydaje, następujące rezultaty pracy:

- uzyskane charakterystyki energetyczne i ekologiczne, określane przez współczynniki empiryczne w równaniach aproksymacyjnych,
- wyznaczone właściwości fizykochemiczne mieszanek paliwowych węgla kamiennego z substancjami odpadowymi.

Literatura

- [1] Atal A., Levendis Y.A.: Comparison of the combustion behaviour of pulverized waste tyres and coal. Elsevier, Fuel tom 74, nr 11, s. 1570-1581, 1995.
- [2] Banasiak K.: Optymalizacja wykorzystania entalpii fizycznej spalin podprocesowych do celów ziębno-grzejnych przy uwzględnieniu aspektów probabilistycznych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2006.
- [3] Billig J.: Analiza energetyczna procesu wytwarzania brykietowanego paliwa bezdymnego. Praca magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 1997.
- [4] Chruściel R. i inni: Sposób energetycznej utylizacji zużytych opon samochodowych i innych odpadów gumowych. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, patent nr 195831, Warszawa 2007.
- [5] Conesa J.A. i inni: Kinetic model for the combustion of tyre wastes. Elsevier, Fuel tom 77 nr 13, s. 1469-1475, 1998.
- [6] Courtemanche B. i inni: A laboratory study on the NO, NO₂, SO₂, CO and CO₂ emissions from the combustion of pulverized coal, municipal waste plastics and tires. Elsevier, Fuel tom 77 nr 3, s. 183-196, 1998.
- [7] Czubala J.: Wpływ strategii paliwowego zasilania kotłów na efektywność handlu uprawnieniami do emisji CO₂ dla wybranej elektrociepłowni przemysłowej. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2008.

- [8] Dyrektywa 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 roku w sprawie składowania odpadów.
- [9] Dyrektywa 2000/76/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 4 grudnia 2000 roku w sprawie spalania odpadów.
- [10] Jaworski T.: Modelowanie matematyczne procesu spalania warstwy odpadów komunalnych na ruszcie paleniska kotłowego. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
- [11] Jaworski T., Wandrasz J.: Modelowanie matematyczne procesu spalania warstwy odpadów komunalnych na ruszcie paleniska kotłowego. Materiały II Międzynarodowej Konferencji Paliwa z Odpadów'99, Międzybrodzie Żywieckie 1999.
- [12] Jełowicki A.: Uzgadnianie bilansów. Biblioteczny program komputerowy.
- [13] Górecka R.: Teoria i technika eksperymentu. Politechnika Krakowska, Kraków 1998.
- [14] Kasprzycki B.: Planowanie eksperymentów – Podstawy matematyczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.
- [15] Kordylewski W.: Spalania i Paliwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [16] Koszorek A., Mianowski A.: Możliwości i ograniczenia w wykorzystaniu klasycznego procesu koksowania jako metody utylizacji odpadów przemysłowych. Politechnika Koszalińska, Roczniki Ochrony Środowiska, Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, styczeń 1999 s. 27-56.
- [17] Kowalewicz A.: Podstawy procesów spalania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [18] Kostowski E.: Przepływ Ciepła. Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 1925, Gliwice 1995.
- [19] Kozioł J., Matusiak P.: Odpady gumowe jako paliwo energetyczne. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Gospodarka Ciepła i Eksploatacja Pieców Przemysłowych, Poraj k. Częstochowy 29–30.09.2005, s. 83-91.
- [20] Kozioł J., Matusiak P.: Method of assessment of coal and alternative fuel co-incineration conditions on ecological effects. 10th International Scientific Conference Energy Transformations in Industry, Tatranska Strba, czerwiec 2007, s. 180-188.
- [21] Kozioł J., Matusiak P.: Nowoczesne technologie energetycznego wykorzystania komunalnych odpadów pochodzenia zwierzęcego. Seminarium Szkoleniowe Komunalna polityka ekoenergetyczna '2007, Rybnik 29-30 październik 2007, s. 81-86.

- [22] Kozioł J., Bukowski Z., Matusiak P.: Testing the reduction properties of coke produced from a mixture of hard coal and rubber wastes. Archives of Metallurgy and Materiale, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN 2009 (w druku).
- [23] Kozioł J., Matusiak P., Chuchnowski W.: Symulacja procesu współspalania węgla kamiennego z gumą z wykorzystaniem programu typu CFD. KOMEKO 2009 Innowacyjne systemy przeróbcze materiałów, Szczyrk, marzec 2009, s. 149-156.
- [24] Kozioł M.: Energetyczne i ekologiczne efekty współspalania osadów ściekowych z węglem w paleniskach kotłów rusztowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
- [25] Li Xiang-guo, Ma Bao-guo, Xu Li, Hu Zhen-wu, Wang Xin-gang: Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. Elsevier, Thermochimica Acta 441, s. 79-83, 2006.
- [26] Mandl B., Stieglitz L.: Formation of organic compounds from toluene with fly ash as catalyst. Chemosphere 1993, 27(1-3) s. 179-186.
- [27] Matusiak P.: Energetyczne i ekologiczne efekty spalania węgla kamiennego z paliwami alternatywnymi. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2009.
- [28] Matusiak P., Pyc A., Kozioł J.: Utylizacja opon samochodowych i odpadów komunalnych. III Seminarium Szkoleniowe Komunalna polityka ekoenergetyczna '2005, Rybnik 20-21 październik 2005 s. 101-107.
- [29] Matusiak P., Pietrasik E., Szkudlarek Z.: Przykładowe koncepcje zasilania kotłów rusztowych i pyłowych mieszanką węgla kamiennego z odpadami o własnościach energetycznych. KOMEKO 2006 Innowacyjne systemy przeróbcze materiałów, Zakopane 21-23 marzec 2006, s. 125-136.
- [30] Matusiak P., Pietrasik E., Szkudlarek Z.: Koncepcje zasilania kotłów rusztowych i pyłowych mieszanką węgla kamiennego z odpadami, opracowane przez CMG Komag. Maszyny Górnicze 2/2006 s. 46-52.
- [31] Matusiak P., Pietrasik E., Szkudlarek Z.: Koncepcje zasilania kotłów, Ekologia nr 5/37/2006 s. 32-35.
- [32] Matusiak P.: Metoda planowania eksperymentu przy ocenie wpływu warunków współspalania na efekty ekologiczne. KOMEKO 2007 Zarządzanie środowiskiem w aspekcie zrównoważonego rozwoju terenów uprzemysłowionych, Szczyrk 20-22.03.2008 s. 323-330.
- [33] Matusiak P., Kozioł J.: Charakterystyka paliwowa mieszanki węgla i gumy. KOMEKO 2008 Innowacyjne systemy przeróbcze materiałów, Szczyrk marzec 2008, s. 149-160.

- [34] Mrożek B., Mrożek Z.: Matlab 5.X Simulink 2.x poradnik użytkownika. Wydawnictwo PLJ, Warszawa 1998.
- [35] Mrożek B., Mrożek Z.: Matlab. Leksykon kieszonkowy. Wydawnictwo Helion, Gliwice 2005.
- [36] Olszowiec P.: Spalanie opon korzystne i... nieuniknione. 2003, Internet: <http://www.gigawat.net.pl/index.php/article/articleview/265/1/32/>
- [37] Owczarek A.: Wpływ substancji mineralnej węgla kamiennych na współspalanie opon samochodowych z miałem węglowym w przemysłowych kotłach rusztowych. Gospodarka Paliwami i Energią nr 02/2004, s. 22-24.
- [38] Pietrasik E. Koncepcja metody zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych z terenu aglomeracji śląskiej. Komeko 2005.
- [39] Pająk T.: Spalanie i współspalanie osadów ściekowych – podstawowe uwarunkowania. Przegląd Komunalny 1/2003.
- [40] Pająk T., Wielgoński G.: Podstawowe uwarunkowania wykorzystania instalacji przemysłowych do współspalania odpadów. Konferencja: Termiczne przekształcanie odpadów –za i przeciw, Szczyrk 2004.
- [41] Pająk T., Wielgoński G.: Wytyczne sporządzania przeglądów ekologicznych instalacji współspalania odpadów. Kraków–Łódź–Warszawa – czerwiec 2004 r., Internet: http://www.mos.gov.pl/odpady/1/przeglady_ekologiczne/wytyczne_7.pdf.
- [42] Petela R.: Paliwa i ich spalanie. Tom 1 Paliwa, Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 774, Gliwice 1978.
- [43] Petela R.: Paliwa i ich spalanie. Tom 2 Spalanie, Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 779, Gliwice 1978.
- [44] Petela R.: Paliwa i ich spalanie. Tom 3 Płomień, Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 845, Gliwice 1979.
- [45] Petela R.: Paliwa i ich spalanie. Tom 4 Palniki, Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 1156, Gliwice 1983.
- [46] Pietrasik E.: Koncepcja metody zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych z terenu aglomeracji śląskiej. Komeko 2005, Zakopane, marzec 2005.
- [47] Pietrasik E., Zacharz T., Matusiak P., Osoba M.: Możliwości współspalania węgla kamiennego z odpadami. Zintegrowany Instytut Naukowo-Techniczny, Seminarium Paliwa–Bezpieczeństwo–Środowisko, Katowice 26 październik 2005.
- [48] Polański Z.: Metodyka badań doświadczalnych. Politechnika Krakowska, Kraków 1981.

- [49] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
- [50] Polański Z.: Współczesne metody badań doświadczalnych. Wiedza Powszechna, Warszawa 1978.
- [51] PN-C-04312:1996 Koks z węgla kamiennego. Oznaczanie reaktywności wobec dwutlenku węgla i wytrzymałości po reaktywności.
- [52] PN-G-04513:1998 Paliwa Stałe – Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej.
- [53] PN-G-04514.08:1977 Paliwa Stałe – Oznaczanie zawartości siarki – Obliczanie zawartości siarki palnej.
- [54] PN-G-04560:1998 Paliwa Stałe – Oznaczanie zawartości wilgoci, części lotnych oraz popiołu analizatorem automatycznym.
- [55] PN-G-04584:2001 Paliwa Stałe – Oznaczanie siarki całkowitej i popiołowej automatycznymi analizatorami.
- [56] PN-G-04502:1990 Węgiel kamienny i brunatny. Metody pobierania i przygotowania próbek do badań laboratoryjnych.
- [57] PN-ISO 1171:2002 Paliwa Stałe – Oznaczanie popiołu.
- [58] PN-ISO 1928:2002 Paliwa Stałe – Oznaczanie ciepła spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
- [59] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2002. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2002.
- [60] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2005-2008. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2005-2008.
- [61] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 29 stycznia 2002 r., dotyczące rodzajów odpadów innych niż niebezpieczne oraz rodzajów instalacji i urządzeń, w których dopuszcza się ich termiczne przekształcanie. Dz.U. Nr 18, poz. 176.
- [62] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki społecznej z dnia 21 marca 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów. Dz.U. Nr 1, poz. 2.
- [63] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 czerwca 2003 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji. Dz.U. Nr 110, poz. 1057.
- [64] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 sierpnia 2003 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji. Dz.U. Nr 163, poz. 1584.
- [65] Roga B., Wnukowska L.: Analiza węgla i koksu, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa 1966.

- [66] Rubber Manufactured Association, Scrap tire markets in the United States, www.rma.org, listopad 2006.
- [67] Sharma V.K. i inni: Desposal of waste tyres for energy recover and safe environment –review. Elsevier, Pergamon tom 39 5/6, 1998, s. 511-528.
- [68] Sharma V.K. i inni: Desposal of waste tyres for energy recover and safe environment. Elsevier, Applied Energy tom 65, 2000, s. 381-394.
- [69] Skalmowski (red.) i inni: Poradnik gospodarowania odpadami. Tom IV, Verlag Dashöfer, Warszawa 2003.
- [70] Sobolewski A., Stelmach S., Wasielewski R.: Termiczne przekształcanie odpadów metodą pirolizy na przykładzie zużytych opon samochodowych. Problemy unieszkodliwiania odpadów, Materiały Konferencyjne, Wyd. Politechnika Warszawska, 2005, s. 23-33.
- [71] Sobolewski A., Stelmach S., Wasielewski R.: Termiczne przekształcanie odpadów metodą pirolizy na przykładzie zużytych opon samochodowych. EKOPROBLEMY, 2006, 4, s. 9-15.
- [72] Stelmach S. Wasielewski R.: Możliwości zastosowania procesu pirolizy do utylizacji zużytych opon samochodowych. Środowisko i Rozwój 13, 2006, s. 91-101.
- [73] Stelmach S., Wasielewski R., Figa J.: Badania pirolizy zużytych opon samochodowych. Paliwa z odpadów, tom V, Wyd. Helion Gliwice, 2005, s. 205-214.
- [74] Stelmach S., Wasielewski R., Figa J.: Badania wytwarzania granulowanych adsorbentów z karbonizatów ze zużytych opon samochodowych. Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, 2006, 4, s. 107-114.
- [75] Stelmach S., Wasielewski R., Jagustyn B.: Określenie zawartości biomasy w paliwach wytwarzanych z odpadów. Przegląd komunalny, Zeszyty Komunalne 9 (56) 2007 s.75-78.
- [76] Srogi K., Koszorek A.: Metody recyklingu odpadów gumowych. Gospodarka Paliwami i Energią nr 04/2004, s. 15-22.
- [77] Szargut J.: Energetyka cieplna w hutnictwie. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1983.
- [78] Szargut J.: Termodynamika Techniczna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [79] Szargut J.: Termodynamika. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1998.

- [80] Szargut J., Guzik A., Górniak H. Zadania z termodynamiki technicznej. Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 1926, Gliwice 1996.
- [81] Szargut J.(red.), Ziębik A., Kozioł J. i inni: Racjonalne użytkowanie energii w zakładach przemysłowych. Biblioteka Fundacji Poszanowania Energii, Warszawa 1994.
- [82] Szargut J. Ziębik A.: Podstawy energetyki ciepłej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [83] Szlęk A.: Badania procesu spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
- [84] The Mathworks: Matlab 7.1.
- [85] Tomeczek J.: Spalanie węgla. Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 1667, Gliwice 1992.
- [86] Tomeczek J.: Spalanie płomieniowe i gazowe. Politechnika Śląska, Skrypty Uczelniane nr 842, Gliwice 1979.
- [87] Uchwała Rady Ministrów nr 219 z dnia 29 października 2002 r. w sprawie krajowego planu gospodarki odpadami. M.P.03.11.159 z dnia 28 lutego 2003.
- [88] Uchwała Nr II/I 1/1/2003 Sejmiku Województwa Śląskiego z dnia 25 sierpnia 2003 r., w sprawie Planu Gospodarki Odpadami Dla Województwa Śląskiego.
- [89] Wandrasz A.: Badania i ocena możliwości wykorzystania wydzielanych stałych składników odpadów komunalnych oraz innych odpadowych substancji organicznych do prefabrykacji paliw. Praca doktorska, Politechnika Śląska, 1999.
- [90] Wandrasz A.: Wykorzystanie palnych substancji organicznych w formowaniu paliw. Przegląd komunalny, Zeszyty Komunalne 9 (56) 2007 s. 69-70.
- [91] Wandrasz J.: Substancje palne w odpadach i procesy formowania paliw. Przegląd komunalny, Zeszyty Komunalne 9 (56) 2007 s. 67-69.
- [92] Wandrasz J. (red.), Nadziakiewicz J.: Paliwa z odpadów. Tom II, Gliwice 1999.
- [93] Wandrasz J. i inni: Wybrane zagadnienia zagospodarowania osadów – Termiczne metody i technologie przetwarzania osadów ściekowych. Gliwice 1995 BK-268/RJE-3/95.
- [94] Wandrasz J., Kozioł M. i inni: Sprawozdanie z wykonania pracy pt. Przeprowadzenie testu współspalania osadów z oczyszczalni ścieków z węglem w EC Fasty wraz z analizami laboratoryjnymi stałych produktów procesu spalania oraz opracowaniem wyników. Część I i II, KTiUZO' Gliwice 1999.

- [95] Wandrasz J.: Kotły w procesach termicznej degradacji odpadów. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 113, Gliwice 1990.
- [96] Wandrasz J. W., Kozioł M. i inni: Możliwości współspalania osadów z oczyszczalni ścieków z węglem w kotłach rusztowych. Gospodarka Paliwami i Energią nr 8, 2000.
- [97] Wasielewski R., Stelmach S., Sobolewski A., Figa J.: Badania aktywacji karbonizatów ze zużytych opon samochodowych. Węgiel Aktywny w Ochronie Środowiska i Przemśle, pod red. Z. Dębowskiego, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2004, s.111-120.
- [98] Wasielewski R., Stelmach S., Sobolewski A.: Wybrane aspekty pirolizy zużytych opon samochodowych. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 2005, 4 (26), s.801-816.
- [99] Wasielewski R., Matuszek K.: Wybrane aspekty współspalania odpadów gumowych. Paliwa z odpadów – tom VI, Pr. zbior. pod red. Janusza W. Wandrasza i Krzysztofa Pikonia; Wyd. HELION, Gliwice; 2007, s. 267-272.
- [100] Wasielewski R., Sobolewski A.: Wybrane aspekty odzysku energii z odpadów gumowych. Recykling i odzysk odpadów polimerowych, Wyd. Instytut Chemii Przemysłowej, Warszawa, 2007, s.181-184.
- [101] Wasielewski R., Stelmach S., Sobolewski A., Figa J.: Badania aktywacji parą wodną karbonizatów ze zużytych opon samochodowych. Inżynieria i Ochrona Środowiska nr 2, 2004, s.141-150.
- [102] Wasielewski R., Sobolewski A.: Wykorzystanie procesu koksowania do termicznej utylizacji odpadów. Karbo nr 2, 2005, s. 107-112.
- [103] Wystemp E., Kozioł J. i inni: Laboratorium z Chłodziem. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [104] www.wikipedia.org.
- [105] Zacharz T., Pietrasik E., Matusiak P.: Współspalanie odpadów w kotłach energetycznych. V Międzynarodowa Konferencja Paliwa z odpadów, Kudowa Zdrój, 19–21 października 2005. Wydawnictwo HELION SA, Gliwice 2005, s. 215-220

Energetyczne i ekologiczne efekty spalania węgla kamiennego z odpadami gumowymi

Streszczenie

Utylizacja odpadów jest jednym z najważniejszych zadań współczesnej cywilizacji. Istnieją poważne przesłanki wskazujące na proces spalania jako na technologię, która ma szansę na pozytywne rozwiązanie tego ważnego cywilizacyjnego problemu. Spalanie odpadów stwarza jednak szczególne trudności z powodu niestabilnego składu odpadów lub w przypadku współspalania nierównomiernego rozkładu odpadów w mieszaninie. W takich warunkach, aby spalanie było zupełne, całkowite i niskoemisyjne układ regulacji musi szybko dostosować odpowiednie parametry powietrza, głównie ilość i rozdział powietrza, przy danych parametrach spalania.

Guma z opon samochodowych jest odpadem, który może być wykorzystany jako paliwo w procesach energetycznych lub jako substancja redukcyjna w hutnictwie lub w cementownictwie. Dokładne poznanie zjawisk zachodzących przy spalaniu węgla z dodatkiem odpadów gumowych wymaga badań laboratoryjnych, a często również koniecznych badań przemysłowych.

W pracy wyznaczono charakterystyki ekologiczne i energetyczne określające wpływ parametrów procesu na emisję oraz entalpię spalin. Zajęto się istotnym problemami występującymi przy współspalaniu węgla z odpadami gumowymi, między innymi udział tych odpadów w paliwie, grubość warstwy paliwa na ruszcie, jak również rozkład w czasie (na długości rusztu) strumienia powietrza.

Badania z tego zakresu, ze względu na ich znaczenie są często podejmowane, lecz złożoność problemu jest tak duża, że istnieje w tym zakresie nadal wiele niewyjaśnionych problemów szczegółowych.

Power and ecological effects of hard coal burning with rubber wastes

Abstract

Wastes treatment is one the most important problems of modern civilization. There are reasons that incineration process can be a technology that solves the wastes problem. However incineration of wastes is problematic due to unstable composition of wastes as well as not even distribution of wastes in the incinerated mixture. In such a situation the control system should quickly adjust air parameters, mainly amount of air, to a changeable composition of wastes to make incineration complete with low emission.

Rubber from used tyres is a waste that can be utilized as a fuel in burning processes or as a reducer in metallurgy and cement industry. Laboratory tests as well as industrial tests are required to get knowledge about phenomena that occur during burning of coal with admixture of waste rubber.

Ecological and power characteristics that determine impact of burning process parameters on emission of gases and enthalpy of emitted gases were determined. Problems in co-incineration of coal with rubber wastes like: rubber wastes content in a fuel, fuel thickness on a grate and air stream distribution (along the grate length) were discussed.

Such tests are often carried out, but complexity of the problem is so high that still there are many problems that are not clear enough.

