

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

ROZPRAWA DOKTORSKA

**ANALIZA PRZYCZYŃ NIEPRAWIDŁOWEJ
EKSPLOATACJI KOTŁÓW WODNYCH**

mgr. inż. Adam Nygard

Promotor:

dr hab. inż. Jarosław Bartoszewicz, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Rafał Urbaniak

Poznań, 2023

*Pragnę serdecznie podziękować każdej osobie,
która przyczyniła się do powstania tej pracy,
a przede wszystkim
prof. Jarosławowi Bartoszewiczowi
za cenne uwagi i wskazówki.*

*Szczególne wyrazy wdzięczności kieruję do
Mamy i rodziny
za cierpliwość i motywację.*

Autor

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract	4
Opis symboli i skrótów	5
1. Odpady w gospodarstwach domowych	6
1.1. Wstęp	6
1.2. Podział odpadów	7
1.3. Produkty gazowe i stałe spalania	17
1.4. Aktualne standardy, normy i akty prawne w ochronie środowiska	36
2. Stan wiedzy	45
3. Teza i cele pracy	52
4. Budowa stanowiska pomiarowego	54
4.1. Schematy pomiarowe	54
4.2. Kotły wytypowane do badań	56
4.3. Analizatory spalin wykorzystane w badaniach	60
5. Metodologia badań	63
6. Wyniki badań	66
6.1. Analiza odpadu komunalnego	66
6.2. Analiza pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15	68
6.3. Analiza pracy kotła Tilgner EKR 20	92
6.4. Ocena efektów pracy kotłów różnych producentów (zest. badań obu kotłów)	116
7. Podsumowanie	119
Bibliografia	122
Załączniki	130
Nr 1. Tabele z wynikami badań kotła Heiztechnik Q EKO 15	130
Nr 2. Tabele z wynikami badań kotła Tilgner EKR 20	136

Streszczenie

W pracy doktorskiej przedstawiono opracowanie metody identyfikacji nieprawidłowego użytkownika urządzeń grzewczych w rzeczywistych warunkach eksploatacji na podstawie ciągłej analizy zawartości tlenu w spalinach.

Czystość powietrza ma niezwykle duży wpływ na jakość życia człowieka. Zanieczyszczone powietrze w znacznym stopniu wpływa na zdrowie ludzi. Jest przyczyną chorób nowotworowych układu krwionośnego oraz oddechowego i innych schorzeń. Według raportu Światowej Organizacji zdrowia WHO (ang. World Health Organization) okazuje się, że Polska ma najgorszą jakość powietrza spośród wszystkich krajów Unii Europejskiej. Kontrola nad emisją w związku z tym staje się działaniem najważniejszym. Podstawowym powodem odpowiedzialnym za wysoką emisję zanieczyszczeń jest spalanie niskiej jakości paliw stałych oraz spalanie lub współspalanie odpadów w sektorze komunalnym. Według raportu „Ochrona środowiska 2021” w Polsce wytwarza się rocznie ok. 14,5 mln ton odpadów komunalnych. Szacuje się, że w Polsce każdego roku ok. 200 kg odpadów komunalnych na osobę spalanych jest w domowych urządzeniach grzewczych lub wyrzucanych, np. do lasów, niezgodnie z przepisami ustawy o odpadach. Podczas badań zdiagnozowano szereg przyczyn, które powodują, że kontrole niewłaściwej eksploatacji kotłów grzewczych w gospodarstwach domowych są nieskuteczne lub ich skuteczność jest niewystarczająca. W związku z tym w pracy odpowiedziano na pytanie o możliwość opracowania procedury pozwalającej na identyfikację niewłaściwej eksploatacji kotła na paliwo stałe opartą o analizę zawartości tlenu w emitowanych spalinach.

Praca została podzielona na siedem rozdziałów. Pierwszy rozdział zawiera podrozdziały opisujące podział odpadów, produkty gazowe i stałe spalania paliw stałych oraz aktualne standardy, normy i akty prawne dotyczące spalania odpadów komunalnych. W opisie odpadów uwzględniono podział na odpady przemysłowe oraz komunalne. Przeanalizowane zostały również ich charakterystyczne rodzaje, takie jak np. odpady niebezpieczne. Część dotycząca produktów gazowych i stałych spalania została poszerzona o aktualne statystyki emisji związków szkodliwych do środowiska. Akty prawne zostały przeanalizowane pod kątem przetwarzania odpadów na paliwa, spalania odpadów w gospodarstwach domowych oraz emisji i sprawności kotłów małej mocy opalanych paliwami stałymi. W drugim rozdziale przeanalizowana została aktualna wiedza opisana w artykułach naukowych dotycząca spalania odpadów komunalnych. W trzecim rozdziale sformułowana została teza badawcza. W kolejnych dwóch rozdziałach przedstawiony został opis budowy stanowiska pomiarowego oraz metodologia przeprowadzonych badań. W rozdziale szóstym wykonano szczegółową analizę uzyskanych wyników. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie.

Badania przeprowadzono w laboratorium Katedry Techniki Ciepłej na Politechnice Poznańskiej na zaprojektowanym przez autora stanowisku badawczym. Do badań autor wykorzystał kotły Q EKO 15 firmy Heiztechnik oraz EKR 20 firmy Tilgner, które są dostępne na rynku polskim i europejskim. W badaniach wykorzystano czujnik do pomiaru tlenu firmy Brager BCA-01 opracowane przez promotora pomocniczego prof. Rafała Urbaniaka. W celu opracowania metody identyfikacji niewłaściwego użytkownika kotłów, badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie kotły zostały przetestowane zgodnie z normą PN-EN 303-5, na paliwie zalecanym przez producenta. W drugim etapie badań przeprowadzono eksperyment symulujący niewłaściwą eksploatację kotłów spalających odpady w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W tym celu dokonano powszechnie stosowanych modyfikacji konstrukcji kotłów, pozwalających na wykorzystanie materiału odpadowego jako paliwa. Podczas badań monitorowano zawartość tlenu w spalinach, zestawiając ją ze zmianą zawartości tlenu węgla oraz temperaturą spalin. Zaobserwowano, że nawet niewielka próba nieprawidłowej obsługi kotła może zostać wykryta na podstawie analizy poziomu tlenu w spalinach. Zależność ta została zaobserwowana przy doprowadzeniu każdego z odpadów, nawet tak niewielkiego, jak butelka plastikowa o wadze 65 g.

Dzięki zastosowaniu metody opartej na ciągłej analizie zawartości tlenu w spalinach można określić masę odpadu. Wyniki badań były analogiczne w przypadku obu kotłów, co świadczy o możliwości zastosowania metody weryfikacji w innych modelach kotłów oraz daje podstawy do stworzenia narzędzia umożliwiającego zdalny monitoring eksploatowanych urządzeń grzewczych przez użytkowników gospodarstw domowych.

Abstract

The doctoral thesis presents the development of a method for identifying incorrect use of heating devices in real operating conditions based on continuous analysis of the oxygen content in exhaust gases.

Air purity has a huge impact on the quality of human life. Polluted air significantly affects human health. It causes cancer of the circulatory and respiratory systems and other diseases. According to a report by the World Health Organization (WHO), Poland has the worst air quality among all European Union countries. Controlling emissions has to be therefore considered as an activity of utmost importance. The main reason responsible for high pollutant emissions is the combustion of low-quality solid fuels and the burning or co-incineration of waste in the municipal sector. According to the Environmental Protection 2021 report (pol. „Ochrona środowiska 2021”), approximately 14.5 million tons of municipal waste is generated annually in Poland. It is estimated that in Poland each year approximately 200 kg of municipal waste per person is burned in home heating devices or thrown away, e.g. into forests, contrary to the waste management regulations. During the research, a number of reasons were identified that make controls on the improper use of heating boilers in households ineffective or their effectiveness is insufficient. Therefore, the study answered the question about the possibility of developing a procedure allowing for the identification of improper operation of a solid fuel boiler based on the analysis of the oxygen content in the emitted exhaust gases.

The work is divided into seven chapters. The first chapter contains subchapters describing the division of waste, gaseous and solid products from the combustion of solid fuels, and current standards, norms and legal acts regarding the incineration of municipal waste. The description of waste includes a division into industrial and municipal waste. Their characteristic types were also analysed, such as hazardous waste. The part regarding gaseous and solid combustion products has been expanded to include current statistics on emissions of harmful compounds into the environment. Legal acts were analysed in terms of processing waste into fuel, waste incineration in households, and emissions and efficiency of low-power boilers fired with solid fuels. The second chapter analyses the current knowledge described in scientific articles regarding the incineration of municipal waste. In the third chapter, the research thesis was formulated. The next two chapters present a description of the construction of the measurement station and the methodology of the conducted research. In the sixth chapter, a detailed analysis of the obtained results was performed. The last chapter contains a summary.

The research was carried out in the laboratory of the Chair of Thermal Engineering at the Poznań University of Technology on a research station designed by the author. For the tests, the author used Q EKO 15 boilers by Heiztechnik and EKR 20 by Tilgner, which are available on the Polish and European market. The research used a Brager BCA01 oxygen measurement sensor developed by the auxiliary advisor Prof. Rafał Urbaniak. In order to develop a method for identifying improper use of boilers, the research was divided into two stages. In the first stage, the boilers were tested in accordance with the PN-EN 303-5 standard, using the fuel recommended by the manufacturer. In the second stage of the research, an experiment was carried out simulating the improper operation of waste-burning boilers in real operating conditions. For this purpose, commonly used modifications to the boiler design were made, allowing the use of waste material as fuel. During the tests, the oxygen content in the exhaust gases was monitored and compared with the change in the carbon monoxide content and the exhaust gas temperature. It has been observed that even a minor attempt to misoperate the boiler can be detected by analysing the oxygen level in the exhaust gases. This dependence was observed when introducing any waste, even as small as a plastic bottle weighing 65 g.

By using a method based on continuous analysis of the oxygen content in exhaust gases, the mass of waste can be determined. The test results were analogous in the case of both boilers, which proves the possibility of using the verification method in other boiler models and provides the basis for creating a tool enabling remote monitoring of heating devices in use by household users.

Opis symboli i skrótów

CO – tlenek węgla [ppm]

Q_N – znamionowa moc kotła [kW]

t – temperatura [°C]

η_k – sprawność kotła [%]

5R (ang. Reduce, Reuse, Recycle, Recovery, and Restore) – Zasada zarządzania odpadami 5R, tłum.: Zmniejsz, Użyj ponownie, Podдай recyklingowi, Odzyskaj i Przywróć

BAT (ang. Best Available Technology) – Najlepsze dostępne techniki

BRAM (niem. Brennstoff aus Müll) – Paliwa z odpadów

BSE (ang. Bovine Spongiform Encephalopathy) – Gąbczasta encefalopatia bydła, potocznie zwana chorobą szalonych krów

CDR (wł. Combustibili Derivato di Rifiutti) – Paliwa pochodzenia odpadowego

CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) – Obliczeniowa dynamika płynów

CHP (ang. Combined Heat and Power) – Kogeneracja energii cieplnej i elektrycznej

CNG (ang. Compressed Natural Gas) – Sprężony gaz ziemny

CSS (wł. Combustibili Solido Secondario) – Paliwa stałe wtórne

DU (ang. Dobson Unit) – Jednostka Dobsona

EBS (niem. Ersatzbrennstoffe) – Paliwa zastępcze

HP 1 – Oznaczenie odpadów niebezpiecznych

HRSG (ang. Heat Recovery Steam Generators) – Generator pary z odzyskiem ciepła

LHV (ang. Low Heating Value) – Wartość opałowa

LOI (ang. Loss On Ignition) – Strata przy zapłonie

LPG (ang. Liquefied Petroleum Gas) – Ciekły gaz z ropy naftowej

MDF (ang. Medium Density Fibreboard) – Płyta pilśniowa średniej gęstości z włókien drzewnych

MSW (ang. Municipal Solid Waste) – Miejskie odpady komunalne

NFR (ang. Nomenclature for Reporting) – Klasyfikacja źródeł emisji

NIR (ang. Near Infrared) – Bliska podczerwień

NMLZO – Niemetanowe Lotne Związki Organiczne

PAKOM – Paliwa Komunalne

PDF (ang. Packaging Derived Fuel) – Opakowania po produktach spożywczych

PID (ang. Proportional Integral Derivative) – Algorytm proporcjonalnie-całkująco-różniczkujący

RDF (ang. Refused Derived Fuel) – Paliwa z odpadów

RI – Liczba Rogi

RMSW (ang. Residual Municipal Solid Waste) – Resztkowe odpady komunalne

SBS (niem. Sekundärbrennstoffe) – Paliwa wtórne

SCR (ang. Selective Catalytic Reduction) – Selektywna redukcja katalityczna

SRF (ang. Solid Recover Fuels) – Odnawialne paliwa stałe

STOT (ang. Specific Target Organ Toxicity) – Działanie toksyczne na narządy docelowe

SWM (ang. Solid Waste Management) – Gospodarka odpadami stałymi

TCDD – 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzodioxyna

TCDF – 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzofuran

TEF (ang. Toxic Equivalency Factor) – Współczynnik równoważny toksyczności

TEQ (ang. Toxic Equivalency) – Równoważnik toksyczności

TGA (ang. Thermogravimetric Analysis) – Analizator termogravimetryczny

TRL (ang. Technology Readiness Level) – Gotowość technologiczna

UE – Unia Europejska

UPPZ – Uboczne Produkty Pochodzenia Zwierzęcego

WHO (ang. World Health Organization) – Światowa Organizacja Zdrowia

WTE (ang. Waste to Energy) – Przetwarzanie odpadów komunalnych na energię

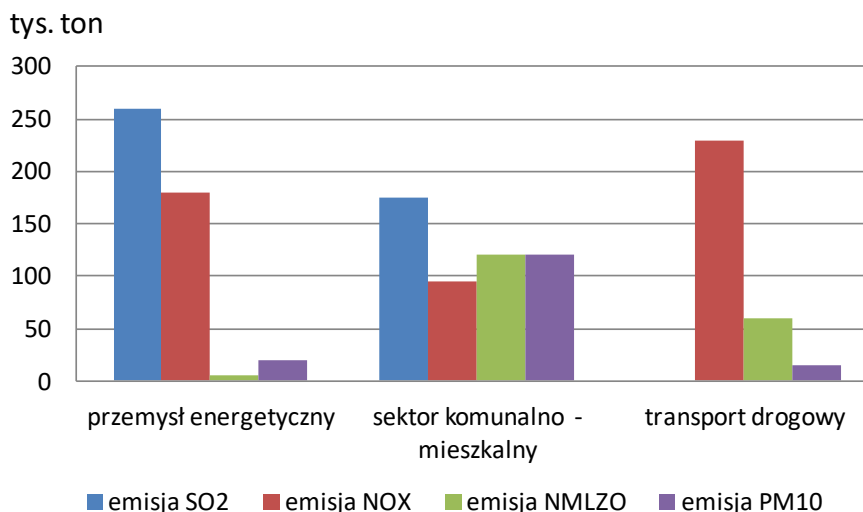
WWA – Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne

1. Odpady w gospodarstwach domowych

1.1. Wstęp

Czystość powietrza ma niezwykle duży wpływ na jakość życia człowieka. Zanieczyszczone powietrze w znacznym stopniu wpływa na zdrowie ludzi. Jest przyczyną chorób nowotworowych układu krwionośnego oraz oddechowego i innych schorzeń. W rejonach zurbanizowanych oraz przemysłowych można zaobserwować największy wpływ zanieczyszczonego powietrza na zdrowie ludzi oraz zwierząt. Problem ten dotyczy również kurortów nadmorskich oraz górskich, w których brak sieci gazowej oraz mała moc doprowadzonej energii elektrycznej powoduje, że miejsca te są odpowiedzialne za schorzenia przybywających tam ludzi. Według raportu Światowej Organizacji zdrowia WHO (ang. World Health Organization) okazuje się, że Polska ma najgorszą jakość powietrza spośród wszystkich krajów Unii Europejskiej [169]. Kontrola nad emisją w związku z tym staje się działaniem najważniejszym.

Ocena jakości powietrza dokonywana jest na podstawie pomiarów jego zanieczyszczenia: dwutlenkiem siarki, tlenkiem węgla, dwutlenkiem azotu, pyłu zawieszonym PM10 oraz PM2.5, metali ciężkich, węglowodorów i innych cząstek. Według rankingu przeprowadzonego przez platformę monitorującą jakość powietrza w 2023 r. W pierwszej dwudziestce europejskich miast o najwyższym stopniu zanieczyszczenia powietrza pyłami zawieszonymi PM10 znajduje się aż dwanaście polskich miast [92]. Zgodnie z art. 25b ustawy z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska Polski Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w Polsce opracowuje, nie rzadziej niż raz na cztery lata, raport o stanie środowiska w Polsce [156]. W raporcie z 2022 r. przedstawiono jak duży wpływ na strukturę emisji zanieczyszczenia powietrza w Polsce ma sektor komunalno mieszkaniowy [140]. Wykazano, że jest on główną przyczyną emisji pyłów zawieszonych. W roku 2022 wielkość ich wynosiła razem ok. 120 tys. ton/rok. Na rysunku 1.1 porównano emisję zanieczyszczeń w Polsce w zależności od sektora gospodarki.



Rys. 1.1. Struktura emisji głównych zanieczyszczeń w Polsce w 2022 roku w podziale na sektory gospodarki [140]

Główną przyczyną tak wysokiej emisji zanieczyszczeń jest niewłaściwa eksploatacja kotłów grzewczych oraz pieców użytkowych podczas ich eksploatacji m.in. w gospodarstwach domowych. Podstawowym powodem odpowiedzialnym za złą jakość powietrza w Polsce jest spalanie niskiej jakości paliw stałych oraz spalanie śmieci domowych przez sektor mieszkaniowy. Około 35 % zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym na cele grzewcze związane jest ze spalaniem węgla kamiennego. Spalanie często odbywa się w starych, niecertyfikowanych kotłach grzewczych, które nie spełniają wymagań dotyczących sprawności i poziomu emisji szkodliwych związków spalin.

1.2. Podział odpadów

Według definicji zawartej w ustawie o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r. za odpad uważa się każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest zobowiązany [155]. Wytwarzanie odpadów przez społeczeństwo jest problemem stale narastającym. Wytwarzane przez społeczeństwo odpady dzieli się ze względu na ich pochodzenie (np. odpady komunalne, szpitalne i odpady przemysłowe), ze względu na ich stan skupienia (stałe lub ciekłe) oraz ze względu na ich wpływ na środowisko (odpady niebezpieczne). Wspomniana wyżej ustawa [155] zawiera definicje odpadów oraz przepisy dotyczące postępowania. Według niej odpady w Polsce dzieli się na 20 grup, co pokazano w tabeli 1.1.

Tab. 1.1. Podział odpadów na grupy wg. Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. [131]

Nr	Opis
01	odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalin
02	odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności
03	odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury
04	odpady z przemysłu skórzanego, futrzarskiego i tekstylnego
05	odpady z przeróbki ropy naftowej oczyszczania gazu ziemnego oraz pirolitycznej przeróbki węgla
06	odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii nieorganicznej
07	odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii organicznej
08	odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania powłok ochronnych (farb, lakierów, emalii ceramicznych), kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich
09	odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych
10	odpady z procesów termicznych
11	odpady z chemicznej obróbki i powlekania powierzchni metali oraz innych materiałów z procesów hydrometalurgii metali niezależnych
12	odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych
13	oleje odpadowe i odpady ciekłych paliw (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05, 12 i 19)
14	odpady z rozpuszczalników organicznych, chłodziw i propelentów (z wyłączeniem grup 07 i 08)
15	odpady opakowaniowe: sorbenty, tkaniny do wycierania, materiały filtracyjne i ubrania ochronne, nieujęte w innych grupach
16	odpady nieujęte w innych grupach
17	odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych)
18	odpady medyczne i weterynaryjne (z wyłączeniem odpadów kuchennych i restauracyjnych niezwiązanych z opieką zdrowotną lub weterynaryjną)
19	odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych
20	odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie

Każdy wytworzony odpad, zanim zostanie odebrany, musi zostać sklasyfikowany do odpowiedniej z 20 grup, które dalej dzieli się na podgrupy i na rodzaje. Następnie odpad ma nadawany odpowiedni sześciocyfrowy kod według schematu:

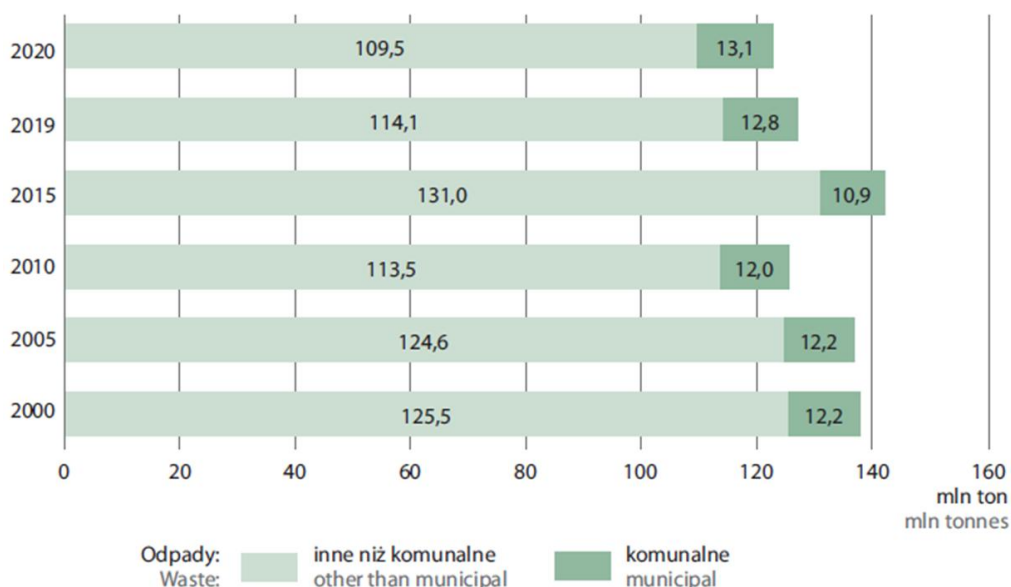
- XX - grupa odpadów,
- XX YY - podgrupa odpadów,
- XX YY ZZ - rodzaje odpadów.

Podział ten jest przedstawiony w Katalogu odpadów [131], który obejmuje około 950 rodzajów odpadów ujętych w 20 grupach. Umożliwia to odpowiednie gospodarowanie odpadami i ich bezpieczną utylizację. W celu nadania „kodu odpadu” uwzględnia się: źródło powstania odpadu, właściwości, które sprawiają, że odpad jest niebezpieczny oraz składniki odpadu, dla których przekroczenie wartości granicznych stężeń substancji niebezpiecznych może powodować, że odpad jest odpadem niebezpiecznym [62]. Przyjmując za kryterium podziału miejsce powstawania odpadów, rozróżnia się grupy odpadów komunalnych, powstającą na terenach zamieszkałych i związaną z bytowaniem ludzi (odpady o kodzie 15 01 z sektora komunalnego oraz grupa 20 katalogu odpadów) oraz odpady przemysłowe, związane z działalnością gospodarczą (pierwsze 19 grup katalogu odpadów) [97]. W tabeli 1.2 przedstawiono przykładowe odpady z nadanymi kodami według katalogu odpadów [131].

Tab. 1.2 Fragment katalogu odpadów [131]

Kod	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów
01	Odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalin
01 01	Odpady z wydobywania kopalin
01 01 02	Odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali
09	Odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych
09 01	Odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych
09 01 08	Błony i papier fotograficzny niezawierające srebra
09 01 10	Aparaty fotograficzne jednorazowego użytku bez baterii

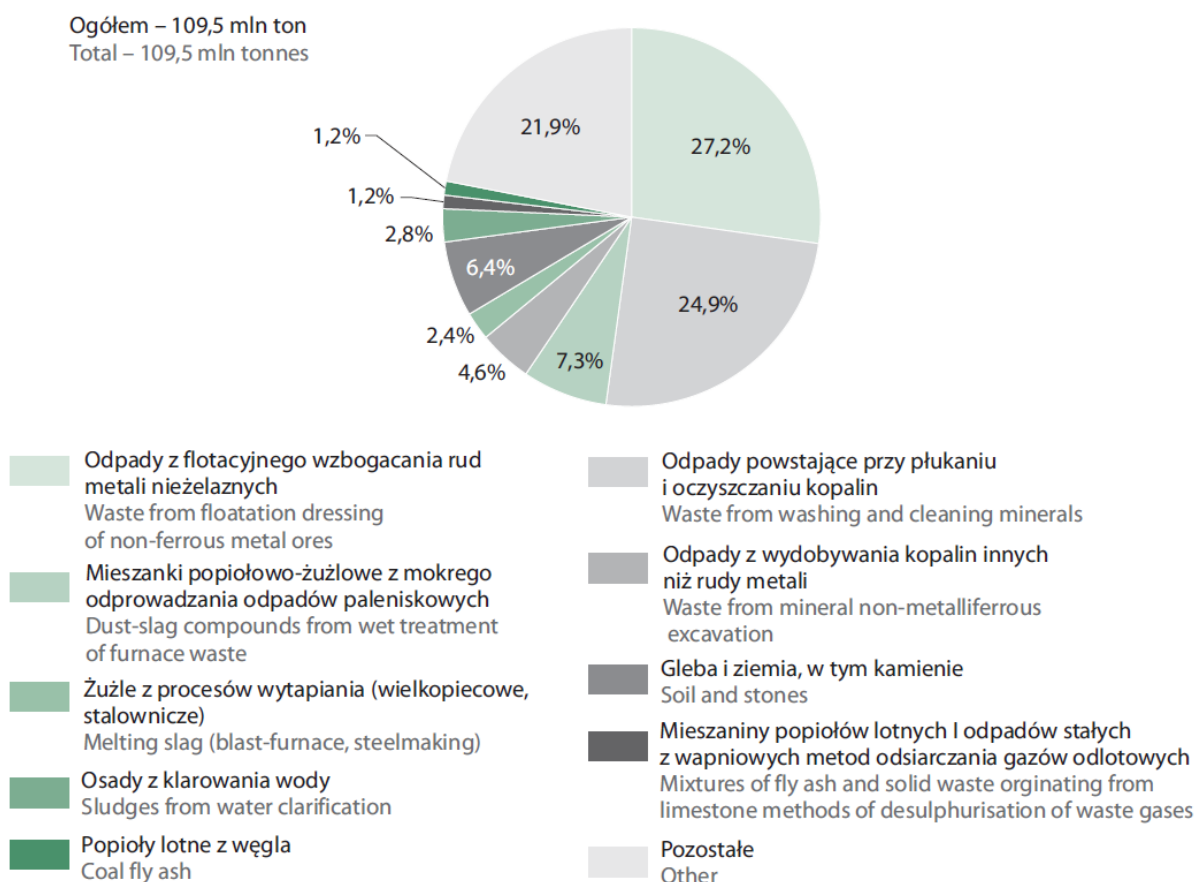
W Polsce pod koniec XX w. Wytwarzało się około 140 mln ton odpadów rocznie, w tym około 13 mln ton odpadów komunalnych [180]. Z początkiem XXI w. ilość wytwarzanych odpadów spadła i mieściła się w zakresie od 110 do 130 mln ton. Na rysunku 1.2 przedstawiono ilość wytworzonych odpadów w Polsce w kolejnych latach XXI w. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego ilość wytworzonych odpadów w 2020 r. Wyniosła 123 mln ton, w tym około 13,1 mln ton odpadów komunalnych [97].



Rys. 1.2. Ilość wytworzonych odpadów w Polsce w kolejnych latach XXI w. [97]

Odpady przemysłowe stanowią pierwsze 19 grup katalogu odpadów i pochodzą od jednostek (zakładów) wytwarzających w ciągu roku sumarycznie powyżej 1 tysiąca ton odpadów, z wyłączeniem odpadów komunalnych, lub posiadających 1 milion ton i więcej odpadów nagromadzonych [62, 155]. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2020 r. Wytworzono 109 466 tys. ton odpadów przemysłowych. Stanowią one ok. 90 % odpadów, jakie powstały w naszym

kraju. Odpady te pochodzą z różnych gałęzi działalności gospodarczej. Głównym źródłem odpadów w 2020 r. były, podobnie jak w latach poprzednich: górnictwo i wydobywanie (55,6 % ilości wytworzonych odpadów ogółem), przetwórstwo przemysłowe (21,1 %) oraz wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę (10,6 %). Odpady przemysłowe są zdecydowanie bardziej jednolite, jeśli chodzi o skład w porównaniu do odpadów komunalnych. Z ogólnej ilości odpadów wytworzonych w 2020 r., 48 % odpadów zostało poddanych odzyskowi, 42 % poddano unieszkodliwieniu poprzez składowanie, a 6 % unieszkodliwiono w inny sposób [97]. Na rysunku 1.3 przedstawiono strukturę odpadów przemysłowych wytworzonych według rodzajów w 2020 r.



Rys. 1.3. Struktura odpadów przemysłowych wytworzonych według rodzajów w 2020 r. [97]

Przez **odpady komunalne** rozumie się, według ustawy [155], odpady powstające w gospodarstwach domowych oraz odpady pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter i skład są podobne do odpadów z gospodarstw domowych, w szczególności niesegregowane (zmieszane) odpady komunalne i odpady selektywnie zebrane. Według ustawy odpady komunalne stanowią 20. grupę odpadów w katalogu odpadów [62] i podzielone są według źródła ich pochodzenia:

- z gospodarstw domowych, w tym papier i tektura, szkła, metale, tworzywa sztuczne, bioodpady, drewno, tekstylia, opakowania, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, zużyte baterie i akumulatory oraz odpady wielkogabarytowe, w tym materace i meble,
- ze źródeł innych niż gospodarstwa domowe, jeżeli odpady te są podobne pod względem charakteru i składu do odpadów z gospodarstw domowych – przy czym odpady komunalne nie obejmują odpadów z produkcji, rolnictwa, leśnictwa, rybołówstwa, zbiorników bezodpływowych, sieci kanalizacyjnej oraz z oczyszczalni ścieków, w tym osadów ściekowych, pojazdów wycofanych z eksploatacji oraz odpadów budowlanych i rozbiórkowych; niesegregowane (zmieszane) odpady komunalne pozostają niesegregowanymi (zmieszanymi).

Inną klasyfikacją odpadów komunalnych jest ich podział ze względu na wartości energetyczne:

- palne, np.: papier, tworzywa sztuczne, drewno skóra, guma, żywność, tkaniny,
- niepalne, np.: szkło, ceramika, kamienie, beton i metale.

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w Polsce w 2020 r. Wytworzono 13117 tys. ton odpadów komunalnych i odnotowano wzrost wytworzenia o 2,9 % w stosunku do roku ubiegłego. Oznacza to zwiększenie ilości wytworzonych odpadów komunalnych na jednego mieszkańca Polski z 332 kg w 2019 r. do 342 kg w 2020 r. Z zebranych oraz odebranych odpadów komunalnych, ok. 7,7 mln ton przeznaczono do odzysku (59 % odpadów komunalnych wytworzonych), z tego do recyklingu przeznaczono 3,5 mln ton (27 %), do przekształcenia termicznego z odzyskiem energii 2,7 mln ton (20 %), do biologicznych procesów przetwarzania (kompostowania lub fermentacji) zostało skierowane 1,6 mln ton (12 %). Do procesów unieszkodliwienia skierowano łącznie 5,4 mln ton, z czego 5,2 mln ton (40 % odpadów komunalnych wytworzonych) przeznaczono do składowania, a pozostałe 0,2 mln ton (1 % wytworzenia) do unieszkodliwienia poprzez przekształcenie termiczne bez odzysku energii [97]. W tabeli 1.3 przedstawiono sposób zagospodarowania odpadów komunalnych w 2020 r. z podziałem na województwa.

Tab. 1.3. Odpady komunalne wytworzone wg. sposobu zagospodarowania i województw w 2020 r. [97]

Województwa	Ogółem	Przeznaczone do			
		recyklingu	kompostowania lub fermentacji	przekształcenia termicznego	składowania
	w tysiącach ton				
POLSKA	13114	3499	1578	2823	5218
Dolnośląskie	1160	395	122	103	539
Kujawsko-Pomorskie	714	159	102	217	236
Lubelskie	522	136	66	140	181
Lubuskie	390	99	42	81	168
Łódzkie	851	222	117	63	449
Małopolskie	1130	313	134	353	331
Mazowieckie	1879	527	212	375	764
Opolskie	372	72	48	60	191
Podkarpackie	502	115	31	136	219
Podlaskie	339	95	40	109	95
Pomorskie	830	191	138	157	344
Śląskie	1780	539	229	190	823
Świętokrzyskie	315	69	16	33	197
Warmińsko-Mazurskie	432	132	37	89	175
Wielkopolskie	1255	287	173	489	306
Zachodniopomorskie	647	148	71	228	199

Znaczący wpływ na skład odpadów komunalnych ma stopień rozwoju społeczeństwa. Przykładowo w społeczeństwach uprzemysłowionych znaczący udział mają odpady pochodzenia organicznego i papier. W przypadku krajów rozwijających się są to odpady nieorganiczne. W tabeli 1.4 porównano procentowy udział składników odpadów komunalnych w ujęciu wagowym w krajach uprzemysłowionych, średniuprzemysłowionych oraz rozwijających się [181].

Tab. 1.4 Skład odpadów komunalnych zależnie od stopnia uprzemysłowienia kraju [181]

Udział składnika [% wag.]	uprzemysłowione	średnio uprzemysłowione	Kraje rozwijające się
Papier	35 ÷ 40	14 ÷ 30	1 ÷ 4
Szkło, ceramika	4 ÷ 9	2 ÷ 10	1 ÷ 6
Metale	3 ÷ 13	1 ÷ 5	1 ÷ 4
Tworzywa sztuczne	2 ÷ 10	4 ÷ 6	1 ÷ 4
Skóra, guma	0 ÷ 1	0 ÷ 2	0 ÷ 7
Tekstylia	2 ÷ 4	4 ÷ 10	1 ÷ 5
Drewno kości	0 ÷ 4	0 ÷ 6	1 ÷ 7
Odpadki żywnościowe	50 ÷ 70	30 ÷ 60	5 ÷ 20
Razem nieorganiczne	20 ÷ 30	25 ÷ 60	35 ÷ 80
Inne	40 ÷ 20	10 ÷ 30	2 ÷ 40

W roku 2015 wycofane zostały normy opisujące procedury oznaczania składu morfologicznego oraz badania właściwości paliwowych stałych odpadów komunalnych [117, 181]. Jednak w związku z brakiem ich aktualizacji stanowią one istotne źródło informacji w pracach naukowych na temat odpadów [164]. Wśród odpadów komunalnych można wyodrębnić liczne charakterystyczne grupy ze względu na ich późniejsze przetwarzanie, jak na przykład: sprzęt gospodarstwa domowego, elektronikę użytkową, wykładziny czy meble. Każda z tych grup ma swój specyficzny skład, na podstawie którego część z nich nadaje się do recyklingu i stanowi cenne źródło surowców wtórnych. Jednak duża ich ilość składowana jest na wysypiskach lub utylizowana w spalarniach. Na przykład specyfiką palnych odpadów z mebli i ich drewnianych elementów konstrukcyjnych jest zawartość w nich farb, lakierów oraz środków konserwujących. W pracy [145] przedstawiono pierwiastkowy skład oraz parametry techniczne odpadów komunalnych, co pokazano w tabeli 1.5.

Tab. 1.5 Charakterystyka odpadów komunalnych [145]

Składnik	C	H	O	N	Cl	S	Wilgoć [%]	Popiół [%]	Ciepło spalania [MJ/kg]
Papier	33,0	4,6	33,0	0,1	0,13	0,21	16	13	12,7
Tworzywa sztuczne	56,4	7,8	8,1	0,85	3,0*	0,3	15	9	18 ÷ 45
Guma i skóra	43,1	5,4	11,6	1,34	5,0	1,2	10	22	19,6
Drewno	41,2	5,0	35,0	0,24	0,1	0,07	16	3	16,2
Tkaniny	37,2	5,0	27,1	3,1	0,3	0,3	25	2	15,3
Odpady ogrodowe	23,3	3,0	17,5	0,9	0,15	0,15	45	10	9,3
Odpadki żywnościowe	18,0	2,5	12,9	1,1	0,4	0,06	60	5	7,6

*W zależności od rodzaju tworzywa udział Cl w nim jest w zakresie 0 ÷ 45 %.

Do najważniejszych cech odpadów komunalnych, istotnych dla procesów spalania w celu przekształcenia termicznego z odzyskiem energii, należą wartość opałowa, emisja związków szkodliwych, gęstość nasypowa oraz porowatość składników odpadów. Najwyższą wartość opałową mają odpady z tworzyw sztucznych. Na przykład polipropylen posiada wartość opałową na poziomie ok. 44 MJ/kg. Granicę autotermicznego spalania odpadów przyjęto na poziomie 6,0 MJ/kg, którą przyjmuje się za kryterium ich palności [91]. Istotną cechą odpadów jest zawartość w nich chloru ze względu na emisję dioksyn i furanów ze spalarni. Z kolei głównym źródłem ciężkich metali takich jak Cu, Cd, Co, Cr, Pb i Zn są odpady z papieru, żywności, gumy i skóry. Materiały takie jak guma, tworzywa sztuczne czy metale cechuje brak porowatości. Z kolei na przykład odpady z papieru, drewna czy żywności mają porowatość zbliżoną do porowatości biomasy. Gęstość nasypowa odpadów różni się w szerokim zakresie ze względu na gęstość ich składników takich jak na przykład: metale 2670 ÷ 13800 kg/m³, szkło 2650 kg/m³, papier 940 kg/m³, wełna około 700 kg/m³. W przypadku tworzyw sztucznych ich gęstość zależna jest od typu tworzywa i produktu.

Według ustawy o odpadach [155] za **odpady medyczne** uważa się odpady powstające w związku z udzielaniem świadczeń zdrowotnych oraz prowadzeniem badań i doświadczeń naukowych w zakresie medycyny. Z kolei za odpady weterynaryjne uważa się odpady powstające w związku z badaniem, leczeniem zwierząt lub świadczeniem usług weterynaryjnych, a także w związku z prowadzeniem badań naukowych i doświadczeń na zwierzętach. Źródłem odpadów medycznych i weterynaryjnych są szpitale, kliniki medyczne i weterynaryjne, gabinety stomatologiczne, hospicja i inne zakłady służby zdrowia. Głównymi składnikami odpadów medycznych są papier oraz tworzywa

sztuczne. W ich skład wchodzi również różnego rodzaju instrumenty medyczne, bandaże, krew, lekarstwa, fragmenty ciał i zwłoki ludzi oraz zwierząt (tab. 3.6). W pracy [162] przedstawiono dane na temat morfologii odpadów medycznych i weterynaryjnych szpitalnych w Polsce. Ich duża różnorodność sprawia, że dzieli się je na kategorie, biorąc pod uwagę ich stopień zagrożenia dla środowiska. Przykładem tego podziału są odpady zakaźne, które są uznawane za odpady niebezpieczne i mają ściśle określone zasady dotyczące ich transportu, magazynowania i unieszkodliwiania. Na przykład obowiązuje je tzw. „zasada bliskości”, która mówi o konieczności przetwarzania ich w najbliższym miejscu, zaczynając od miejsca ich powstania, uwzględniając hierarchię sposobów postępowania z odpadami oraz najlepszą dostępną techniką lub technologią. Zakaźne odpady medyczne oraz weterynaryjne unieszkodliwia się przez termiczne przekształcanie w spalarniach odpadów niebezpiecznych. W tabeli 1.6 przedstawione zostały ważniejsze składniki odpadów medycznych wraz z odpowiadającymi im wartościami gęstości, wilgotności i wartości opałowej.

Tab. 1.6 Ważniejsze składniki odpadów medycznych [162]

Składnik	Gęstość [kg/m ³]	Wilgoć [%]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Fragmenty ciał	810 ÷ 1200	70 ÷ 90	1,9 ÷ 8,4
Tworzywa sztuczne	80 ÷ 2300	0 ÷ 1	22,7 ÷ 45,8
Wymazy, absorbenty	80 ÷ 1000	0 ÷ 30	13,0 ÷ 27,9
Alkohole i pochodne	800 ÷ 1000	0 ÷ 0,2	25,6 ÷ 32,6
Zwłoki zwierząt	500 ÷ 1300	60 ÷ 90	2,1 ÷ 14,9
Szkło	2800 ÷ 3600	0	0
Pościel i inne	320 ÷ 750	10 ÷ 50	9,3 ÷ 18,8
Papier, gaza i inne	80 ÷ 1000	6 ÷ 30	13,0 ÷ 27,9
Noże i igły	7300 ÷ 8100	0,1	0 ÷ 0,14
Różne płyny	1000 ÷ 1020	80 ÷ 100	0 ÷ 4,6

Osady ściekowe. Jednym z problemów związanym z oczyszczaniem ścieków przemysłowych i komunalnych jest powstający podczas procesów oczyszczania odpad w postaci osadu ściekowego, który ze względu na swoje właściwości wymaga odpowiedniego zagospodarowania. W tabeli 1.7 przedstawiono ilość wytworzonych osadów w postaci suchej masy w kolejnych latach XXI w. z przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków.

Tab. 1.7 Osady z przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków [97]

Rok	2000	2005	2010	2015	2019	2020
Osady wytworzone ogółem [tys. ton]	1063,1	1124,4	895,1	951,5	1048,7	989,5

W 2020 r. ilość osadów ściekowych powstających w przemysłowych oczyszczalniach ścieków zmniejszyła się o 40 % w stosunku do 2000 r. W 2000 r. zostało wytworzonych 703,3 tys. ton suchej masy, a w 2020 r. ilość ta spadła do 420,6 tys. ton. Problem stanowi stale rosnąca ilość osadów ściekowych w sektorze komunalnym. Od 2000 r. do 2020 r. ilość osadów ściekowych wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków wzrosła o ok. 58 %. Ilość osadów ściekowych wytworzonych w 2020 r. W oczyszczalniach komunalnych wyniosła 568,8 tys. ton suchej masy i stanowiła 58 % całkowitej masy osadów wytworzonych w danym roku [97]. Problem ten wynika ze wzrostu ilości ścieków trafiających do tych oczyszczalni i ich wysokiego uwodnienia na poziomie 97 ÷ 99 %. Według ustawy o odpadach [155] za komunalne osady ściekowe uważa się pochodzący z oczyszczalni ścieków osad z komór fermentacyjnych i innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz innych ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych. Osady ściekowe to organiczno-mineralna faza stała, wyodrębniona ze ścieków komunalnych w procesie sedymentacji [11]. W ich skład wchodzi substancje ciekłe oraz stałe różnego pochodzenia. Zawierają one duże ilości protein, węglowodanów, tłuszczów czy olejów. W ściekach znajdują się również niebezpieczne substancje organiczne i nieorganiczne oraz toksyczne i chorobotwórcze mikroorganizmy [13]. W tabeli 1.8 przedstawiono porównanie oraz analizę składu elementarnego osadów ściekowych oraz węgla kamiennego. Zaobserwowany został w niej duży udział metali ciężkich w osadzie.

Tab. 1.8 Analiza elementarna węgla kamiennego i osadu w stanie suchym [13]

Składnik	C	H	N	S	Cl	O	Pb	Cd	Hg	Zn	Ni	As	Cu	Co	Cr
	[% wag.]						[mg/kg s.m.]								
Węgiel	79,2	4,7	1,8	0,9	0,7	7,6	20	<1	<2	15	3	5	23	<2	<2
Osad	30,9	4,6	4,5	1,1	0,1	26,5	211	2	<2	567	32	10	829	3	62

Zawartość substancji stałej w osadach ściekowych wynosi od 0,25 do 12 %. Surowe osady organiczne są niebezpieczne pod względem sanitarnym, gdyż zawierają, między innymi: bakterie chorobotwórcze, grzyby, wirusy oraz pasożyty [16]. W związku z tym osady poddaje się procesom kondycjonowania, odwodnienia oraz stabilizacji w celu umożliwienia ich transportu i przetwarzania. Kondycjonowanie jest procesem wywierającym wpływ na zmianę struktury i właściwości osadów, pozwalającym na bardziej skuteczne usuwanie zawartej w osadach wody [10, 12, 79]. Najczęściej stosuje się je przed mechanicznym odwadnianiem, a rzadziej przed procesami zagęszczania grawitacyjnego. Polegać ono może na przygotowaniu: chemicznym (np. polimerami), fizycznym (np. ultradźwiękami), termicznym (np. termo kondycjonowanie), przemysłowym, wymrażaniu, zastosowaniu dodatków (np. poprzez dodanie popiołu lub talku) [16, 172].

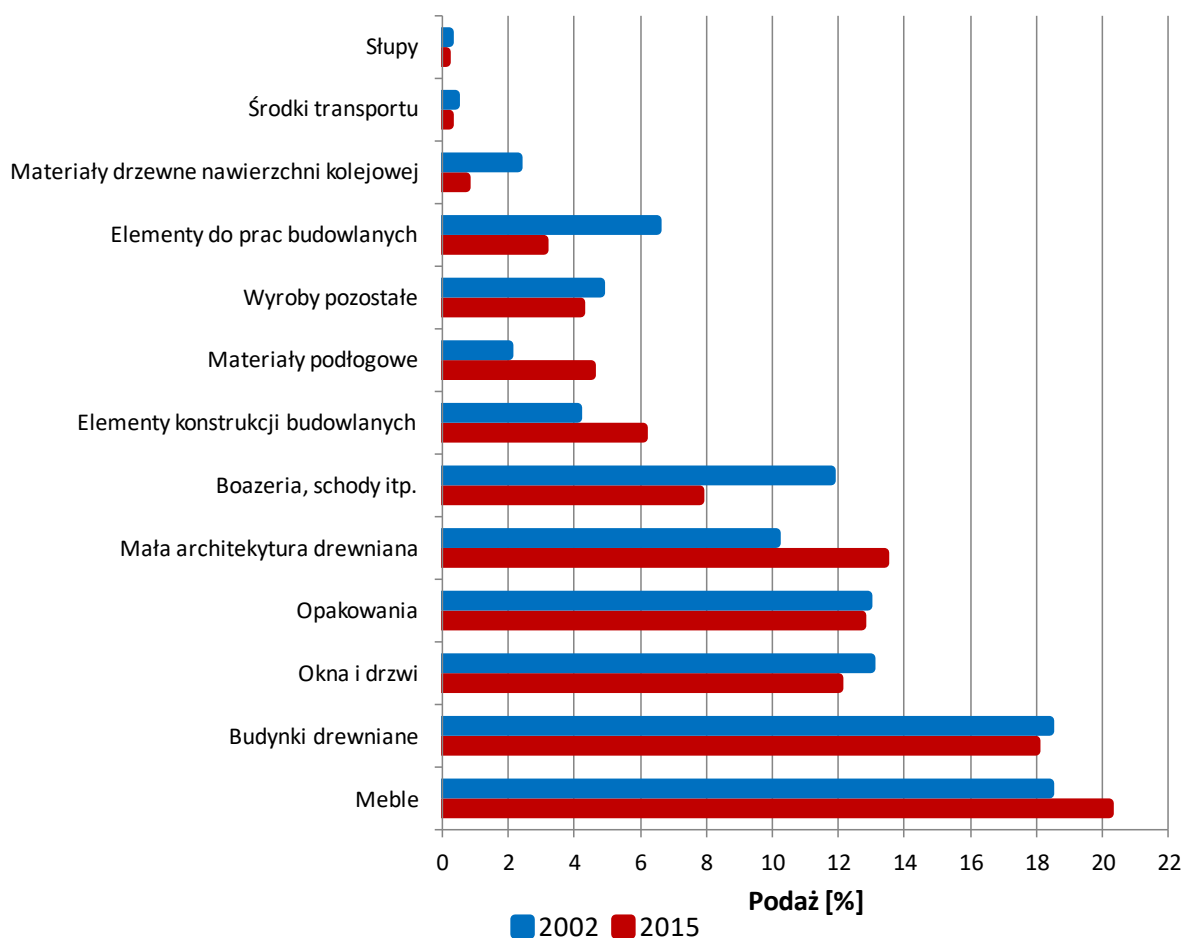
Odwadnianie osadów ściekowych to proces, w wyniku którego otrzymuje się praktycznie bezwonny granulaty o wartości opałowej około 20 MJ/kg s.m. W jego skład wchodzi następujące etapy: zagęszczanie, odwadnianie właściwe, kondycjonowanie i suszenie. W tabeli 1.9 zamieszczono informacje dotyczące etapów, rodzajów substancji powstających z osadów oraz zawartość wody występujących w substancjach. Podczas zagęszczenia osad zmniejsza swoją objętość w wyniku usunięcia części wody, jednocześnie nie tracąc swojej płynnej konsystencji. Mechaniczne odwadnianie osadów przeprowadza się za pomocą wirówek i pras. Do procesu suszenia odpadów ściekowych wykorzystuje się suszarki posiadające konstrukcje bębnową lub fluidalną [12].

Tab. 1.9 Odwadnianie osadów [12]

Etap	Substancja	Udział wody [%]
-	Osad	95
Zagęszczenie	Zagęszczony osad	90
Mechaniczne odwadnianie	Odwodniony osad	75
Kondycjonowanie	Kondycjonowany osad	65
Suszenie	Suszony osad	5

Stabilizacja osadów. Wyróżnia się trzy sposoby stabilizacji osadów: fermentacja beztlenowa, wapnowanie i obróbka cieplna. Fermentacja beztlenowa (metanowa) jest podstawową metodą stabilizacji osadów ściekowych, polegającą na biochemicznej konwersji części substancji organicznej w gaz i stabilną pozostałość. Gaz pofermentacyjny (ok. $2/3\text{CH}_4$ i $1/3\text{CO}_2$), mający wartość opałową około 23 MJ/m^3 , nadaje się do energetycznego wykorzystania po oczyszczeniu z siarkowodoru [14]. Zmniejszona o około 50 % objętości stała pozostałość osadu ma wartość opałową około $10,5 \text{ MJ/kg s.m.}$ [11]. Wapnowanie osadów ściekowych sprowadza się do wykorzystania wapna palonego w procesie hydratacji, co zapewnia higienizację osadu na skutek niszczenia organizmów chorobotwórczych i usunięcia fetoru, w wyniku podniesienia temperatury i wysokiego pH (≈ 12). Plusem wapnowania jest stabilizacja osadu w wyniku jego zagęszczenia, minusem z kolei jest zwiększenie objętości osadu oraz zmniejszenie wartości opałowej. Stabilizacja termiczna jest metodą energochłonną. Polega ona na podgrzaniu osadu najpierw do temperatury $30 \div 75 \text{ }^\circ\text{C}$, a później do $75 \div 190 \text{ }^\circ\text{C}$ przy zwiększonym ciśnieniu. Nie wpływa istotnie na jakość osadu, ale powoduje uwolnienie niektórych substancji organicznych, NH_3 i ciężkich metali w postaci odcieków [168]. Jednym ze sposobów przeróbki osadów ściekowych, powstających w procesie oczyszczania ścieków, jest również stabilizacja tlenowa [55, 119]. Procesy rozkładu związków organicznych zachodzą tu z wykorzystaniem mikroorganizmów w warunkach tlenowych. Konieczne jest ciągłe napowietrzanie, a dostarczany tlen zapewnia efektywne utlenianie związków organicznych i tym samym zmniejszenie podatności na zagniwianie. Obecność bakterii i tlenu powoduje przekształcenie białek, skrobi, cukrów prostych oraz tłuszczów, lignin i pektyn w stabilne produkty organiczne, jakimi są: woda, ditlenek węgla, siarczany i azotany [121].

Drewno użytkowe to odpady drzewne, zawierające zużyte elementy drewniane takie jak: opakowania, stolarka budowlana, elementy konstrukcyjne, zużyte meble itp. [27]. Inna definicja opisuje drewno użytkowe jako biomasę drzewną pochodzącą z rozbiórek, biomasę z wyrobów, które mogą być wykorzystane do produkcji tego samego produktu, lecz o innym przeznaczeniu oraz biomasę wyrobów, które zakończyły swój cykl życia [87, 100]. Precyzyjną definicję można odnaleźć w niemieckim rozporządzeniu, w myśl którego odpady użytkowe to zużyte produkty wytworzone z drewna litego, różnych wyrobów drzewnych i materiałów kompozytowych, składające się w ponad 50 % (w stosunku do ich masy) z drewna [2]. Potrzeba zagospodarowania tych odpadów wynika ze skali wytwarzania drewna użytkowego w Polsce oraz z ograniczeń w jego składowaniu. W 2002 r. ilość wytworzonego drewna użytkowego w Polsce wynosiła około 5,3 mln m³, tj. około 2,9 mln ton [125, 126]. W 2015 r. ilość wytworzonego drewna użytkowego nie uległa istotnym zmianom i kształtowała się na poziomie około 5,7 mln m³, tj. około 3,1 mln ton [77]. Około 51 % czyli 2,9 mln m³, tj. 1,5 mln ton tego rodzaju odpadów pochodziła z budownictwa. Około 28 % czyli 1,6 mln m³, tj. 0,9 mln ton drewna użytkowego wygenerowały gospodarstwa domowe, obiekty mieszkalne, niemieszkalne i ich otoczenie oraz 11 %, tj. 0,7 mln m³, 0,3 mln ton handel i gospodarka magazynowa. Biorąc pod uwagę strukturę podaży drewna użytkowego według wyrobów, największe ilości tego rodzaju odpadów w 2015 r. pochodziły z wyeksploatowanych mebli (1,2 mln m³) i budynków drewnianych (1,0 mln m³), stanowiąc łącznie około 40 % potencjalnej podaży analizowanych użytkowych odpadów drzewnych. W 2015 r. zaobserwowany został wzrost udziału drewna użytkowego z płyt drewnopochodnych z 15 do 22 %, przy równoczesnym spadku udziału drewna użytkowego z wyrobów z drewna litego z 85 do 78 % [125, 126]. Na rysunku 1.4 przedstawiona została struktura podaży w ujęciu procentowym drewna użytkowego w Polsce według rodzajów wyrobów w 2002 i 2015 r [77].



Rys. 1.4. Struktura podaży [%] drewna użytkowego w Polsce według rodzajów wyrobów w 2002 i 2015 r. [77]

Głównym kierunkiem utylizacji odpadów z drewna użytkowego jest wykorzystanie ich do celów energetycznych przez ich spalanie oraz zgazowanie. W tabeli 1.10 przedstawiono najważniejsze parametry energetyczne drewna użytkowego takie jak: części lotne, popiół, wilgoć oraz wartość opałową [27].

Tab. 1.10 Właściwości energetyczne drewna użytkowego [27]

Rodzaj drewna	Części lotne [%]	Popiół [%]	Wilgoć [%]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Drewno w stanie naturalnym	79,60	0,52	7,31	18,7
Elementy ogrodowego	81,96	0,94	5,16	18,4
Podkłady kolejowe	84,65	0,54	6,75	20,1
Drewno rozbiórkowe	81,24	1,03	9,30	18,1
Stare okna	79,65	7,46	7,98	17,5
Drzwi wewnętrzne	81,87	3,16	7,98	18,8
Stare zużyte meble	79,37	0,77	7,69	18,4

Szczególnie analizowanym tematem w kontekście odpadów z drewna użytkowego jest rodzaj i stopień ich zanieczyszczenia [26, 52 161]. Odpady powstające w odpowiednich branżach sektora drzewnego charakteryzuje podobieństwo postaci oraz właściwości natury fizycznej i chemicznej. Do najczęściej występujących w odpadach drzewnych zanieczyszczeń należą środki zaklejające (żywice syntetyczne sześciu rodzajów oraz kleje topliwe), środki zabezpieczające (hydrofobowe, ogniochronne, grzybobójcze i owadobójcze), materiały uszlachetniające (papiery i folie dekoracyjne, laminaty, powłoki malarsko-lakiernicze, szkło, tekstylia, materiały termoplastyczne), zanieczyszczenia mechaniczne (łączniki, okucia), zanieczyszczenia mineralne (cement, gips, piasek) [77]. Biorąc pod uwagę podaż materiałów i wyrobów drzewnych, ich charakterystykę i przeznaczenie, największe ilości odpadów zanieczyszczonych różnego rodzaju środkami chemicznymi generuje przemysł meblarski oraz przemysł tworzyw drzewnych, głównie branża płyt wiórowych i MDF (ang. Medium Density Fibreboard). W tabeli 1.11 przedstawiono procentowy udział azotu, węgla i wodoru w odpadach drzewnych [175]. Wykorzystanie drewna użytkowego w celach energetycznych poprzez bezpośrednie spalanie może stwarzać niebezpieczeństwo emisji toksycznych zanieczyszczeń, wynikających z obecności w nim syntetycznych substancji chemicznych użytych w celu poprawy jego właściwości oraz ochrony przed korozją biologiczną. Dlatego w Niemczech stosuje się podział drewna użytkowego przeznaczonego do spalania na cztery grupy [27]:

- I. odpady z „naturalnego” drewna, bez syntetycznych dodatków,
- II. inne niż „naturalne” odpady drzewne, niezawierające PVC i impregnatów,
- III. inne niż „naturalne” odpady drzewne, zawierające PVC, ale nie zawierające impregnatów,
- IV. odpady drzewne zawierające impregnaty.

W zależności od grupy określa dopuszczalną technologię ich termicznego przekształcania. Tylko odpady z pierwszej grupy można spalać bez ograniczeń.

Tab. 1.11 Zawartość [%] azotu, węgla i wodoru w odpadach drzewnych [175]

	N	C	H	C/N
Odpady sklejki suchotrwałej	8,41	45,62	7,64	5,4
Odpady sklejki wodoodpornej	0,62	49,72	7,06	80,2
Odpady płyt pilśniowych	0,19	47,94	5,65	252,3
Mieszane odpady drzewne ze składowisk komunalnych	1,46	47,48	6,94	32,5
Zużyte meble ze składowisk komunalnych	3,22	47,30	7,10	14,7
Pył z produkcji MDF	5,12	48,35	6,83	9,4
Odpady płyt wiórowych	4,30	48,60	6,00	11,3
Lite drewno sosny	0,23	46,55	5,95	202,4

Według ustawy o odpadach [155] **odpady niebezpieczne** oznaczają te, które wykazują co najmniej jedną spośród właściwości niebezpiecznych. Właściwości powodujące, że odpady są odpadami niebezpiecznymi oraz warunki uznania odpadów za niebezpieczne, z wyjątkiem warunków uznania odpadów za posiadające właściwości zakaźne, określają przepisy rozporządzenia Komisji (UE) nr 1357/2014 z dnia 18 grudnia 2014 r. [129]. Właściwości niebezpieczne odpadów, w zależności od ich

rodzaju, mają przypisane konkretne oznaczenie. Według rozporządzenia właściwości odpadów, które czynią z nich odpady niebezpieczne to:

- HP 1, Wybuchowe: odpady, które w wyniku reakcji chemicznej mogą wydzielać gaz o takiej temperaturze, ciśnieniu i z taką szybkością, że mogą powodować zniszczenia w otoczeniu. Definicja obejmuje odpady pirotechniczne, odpady wybuchowego nadtlenu organicznego i wybuchowe samoreaktywne odpady.
- HP 2, Utleniające: odpady, które mogą, zazwyczaj poprzez utlenianie, spowodować zapalenie się innych materiałów lub przyczynić się do ich spalania.
- HP 3, Łatwopalne:
 - łatwopalne odpady ciekłe: odpady ciekłe o temperaturze zapłonu poniżej 60 °C lub odpadowy olej gazowy, olej napędowy i lekkie oleje opałowe o temperaturze zapłonu > 55 oraz ≤ 75 °C,
 - łatwopalne odpady piroforyczne ciekłe i stałe lub ciekłe, które nawet w małych ilościach mogą ulec zapaleniu w ciągu pięciu minut po wejściu w kontakt z powietrzem,
 - łatwopalne odpady stałe: odpady stałe, które łatwo ulegają zapaleniu lub w wyniku tarcia mogą powodować zapalenie czy przyczynić się do spalania,
 - łatwopalne odpady gazowe: odpady gazowe, które łatwo ulegają zapaleniu w powietrzu w temperaturze 20 °C i przy ciśnieniu normalnym 101,3 kPa,
 - odpady reagujące z wodą: odpady, które w kontakcie z wodą wydzielają gazy palne w niebezpiecznych ilościach,
 - inne łatwopalne odpady: wyroby aerozolowe łatwopalne, łatwopalne odpady samonagrzewające się, łatwopalne nadtlarki organiczne i łatwopalne odpady samoreaktywne.
- HP 4, Drażniące: działanie drażniące na skórę i powodujące uszkodzenie oczu: odpady, które w wyniku naniesienia mogą powodować podrażnienie skóry lub uszkodzenie oka.
- HP 5, Działanie toksyczne na narządy docelowe STOT (ang. Specific Target Organ Toxicity) lub zagrożenie spowodowane aspiracją: odpady, które mogą działać toksycznie na narządy docelowe na skutek jednokrotnego lub powtarzanego narażenia albo takie, które powodują ostre skutki toksyczne na skutek aspiracji.
- HP 6, Ostra toksyczność: odpady, które mogą spowodować ostrą toksyczność po podaniu drogą pokarmową, po naniesieniu na skórę lub po narażeniu inhalacyjnym.
- HP 7, Rakotwórcze: odpady, które wywołują raka lub zwiększają zachorowalność na niego.
- HP 8, Żrące: odpady, które w wyniku naniesienia działają żrąco na skórę.
- HP 9 Zakaźne: odpady zawierające żywe drobnoustroje lub ich toksyny, o których wiadomo lub co do których istnieją wiarygodne podstawy do przyjęcia, że wywołują choroby u ludzi lub innych żywych organizmów.
- HP 10, Działające szkodliwie na rozrodczość: odpady działające szkodliwie na funkcje rozrodcze i płodność u dorosłych osobników płci męskiej i żeńskiej oraz powodujące toksyczność rozwojową u potomstwa.
- HP 11, Mutagenne: odpady, które mogą spowodować mutację, tj. trwałą zmianę w ilości lub strukturze materiału genetycznego w komórce.
- HP 12, Uwolnienie gazów o ostrej toksyczności: odpady, które uwalniają gazy o ostrej toksyczności w zetknięciu z wodą lub kwasem.
- HP 13, Uczulające: odpady zawierające jedną lub więcej substancji, o których wiadomo, że działają uczulająco na skórę czy na układ oddechowy.
- HP 14, Ekotoksyczne: odpady, które stanowią albo mogą stanowić bezpośrednio, lub opóźnione zagrożenie dla co najmniej jednego elementu środowiska.
- HP 15, Odpady mogące wykazywać niebezpieczne właściwości wymienione powyżej, które nie były bezpośrednio widoczne w odpadach pierwotnych.

Źródłem pochodzenia odpadów niebezpiecznych mogą być zakłady przemysłowe, laboratoria badawcze, szpitale, gospodarstwa domowe oraz rolne i inne. Lista odpadów niebezpiecznych jest bardzo obszerna i została przedstawiona w katalogu odpadów [131]. Do najczęściej spotykanych niebezpiecznych substancji odpadowych należą: rozpuszczalniki, agrochemikalia, konserwanty, ropopochodne szlamy, smoły, kwasy, związki metali ciężkich, chlorowcopochodne i wiele innych.

W związku z dużą różnorodnością odpadów niebezpiecznych trudno jest przedstawić ich charakterystyczny skład. Odpady niebezpieczne nierzadko są połączone z innymi nieszkodliwymi odpadami, np. drewno pomalowane chemicznym lakierem, czy ziemia skażona związkami organicznymi typu: benzen, toluen i ksylen.

Odpady zwierzęce scharakteryzowane są w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 określające przepisy sanitarne dotyczące UPPZ (Uboczne Produkty Pochodzenia Zwierzęcego), nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi [132]. W Państwach Członkowskich UE rocznie powstaje ponad 20 milionów ton UPPZ, z czego w Polsce ok. 2 miliony ton. Niezgodne z prawem zagospodarowanie UPPZ może mieć negatywny wpływ na bezpieczeństwo sanitarno - weterynaryjne w kraju, poprzez możliwość rozprzestrzeniania chorób zwierzęcych np. BSE (ang. Bovine Spongiform Encephalopathy) lub zanieczyszczeń chemicznych (np. dioksyny). UPPZ mogą być niebezpieczne dla zdrowia ludzi i zwierząt, jeśli nie zostaną odpowiednio usunięte. Przepisy UE regulują ich przemieszczanie, przetwarzanie i usuwanie [147]. Na podstawie Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady [132] uboczne produkty pochodzenia zwierzęcego są kategoryzowane na podstawie analizy ryzyka, jako materiały szczególnego, wysokiego lub niskiego ryzyka. Według ustawy o odpadach [155] uboczne produkty pochodzenia zwierzęcego są traktowane jako odpady w momencie, kiedy są odpadami przewidzianymi do składowania na składowisku odpadów albo do przekształcania termicznego, do wykorzystania w zakładzie produkującym biogaz lub w kompostowni, zgodnie z tym rozporządzeniem. Dodatkowo według ustawy o środkach żywienia zwierząt [158], zastąpionej później ustawą o paszach [157], zakazano stosowania mączek mięsno-kostnych w żywieniu zwierząt, co spowodowało konieczność utylizacji odpadów pochodzenia zwierzęcego. W związku z powyższymi przepisami, najczęstszym sposobem postępowania z pozostałościami zwierzęcymi, pochodzącymi z procesu technologicznego, jest przekazywanie ich do zakładu utylizacji (popularnie zwanego „bakutylem”) [98]. Utylizacja odpadów poubojowych przebiega w dwóch etapach. Podczas pierwszego etapu wytwarza się z odpadów produkty bezpieczne pod względem higienicznym, którymi są mączki i tłuszcze odpadowe. Drugi etap utylizacji polega na ich spalaniu [32]. Proces utylizacji odpadów zwierzęcych polega na rozdrobnieniu odpadów, suszeniu, sterylizacji, prasowaniu, odtłuszczeniu, chłodzeniu i mieleniu. Biorąc pod uwagę złożoność stosowanych technologii wytwarzania z odpadów zwierzęcych mączek mięsno-kostnych i tłuszczów, można je zaliczyć do paliw z odpadów. W tabeli 1.12 przedstawiono porównanie parametrów mączki mięsnej, kostnej oraz tłuszczu.

Tab. 1.12 Parametry mączek mięsno-kostnych i tłuszczu [134]

Parametr	Mączka mięsna	Mączka kostna	Tłuszcz
C [%]	43,8	32,0	77,1
H [%]	5,3	4,5	12,3
O [%]	17,0	-	5,5
N [%]	8,9	7,6	0,06
Cl [%]	0,6	0,3	<0,09
Popiół [%]	20,5	38,0	0,21
Wilgoć [%]	3,4	4,0	0,31
Tłuszcz [%]	11,8	14,0	98,0
Wartość opałowa [MJ/kg]	20,0	14,0	38,0

1.3. Produkty gazowe i stałe spalania

Jako pierwszą grupę, ze względu na pochodzenie zanieczyszczeń, można wymienić zanieczyszczenia pochodzące w wyniku spalania pierwiastków węgla i węglowodorów, czyli podstawowych składników paliw kopalnych. Jednym z główniejszych produktów spalania paliw kopalnych jest dwutlenek węgla. Na przykład w wyniku całkowitego spalania metanu otrzymujemy CO₂ i H₂O, a produktem całkowitego spalania węgla jest tylko, co jest możliwe tylko teoretycznie. W warunkach rzeczywistych, nawet przy nadmiarze tlenu doprowadzanego do procesu spalania lub przy spalaniu z niedoborem tlenu w spalinach pojawi się tlenek węgla. Inne produkty niezupełnego spalania węglowodorów to: aldehydy, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i sadza. Na

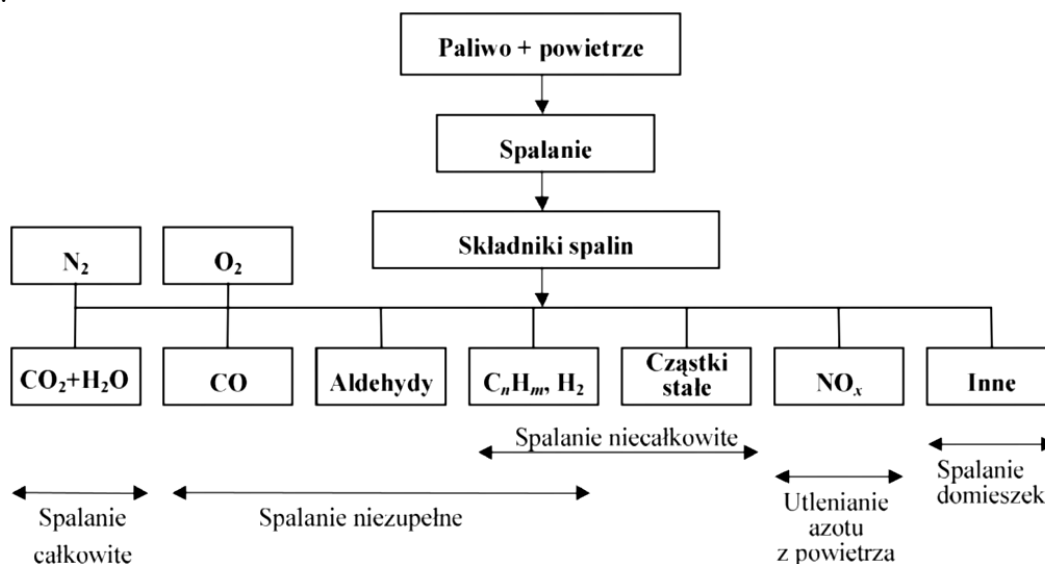
rysunku 1.5 przedstawiony został schemat rzeczywistego procesu spalania, na którym wyszczególnione zostały główne składniki spalin w zależności od rodzaju spalania.

Kolejną grupą zanieczyszczeń, które mogą powstawać w wyniku spalania, są zanieczyszczenia spowodowane występowaniem w paliwach niepożądanych domieszek lub pojawieniem się procesów ubocznych. Do tej grupy zanieczyszczeń należą głównie: tlenki azotu, tlenki siarki i popiół.

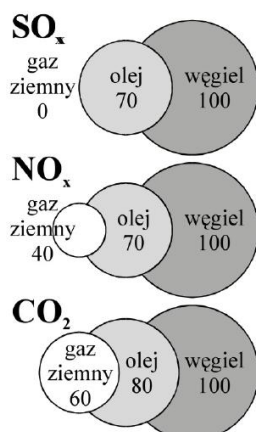
Inny sposób podziału zanieczyszczeń może opierać się na udziale w całkowitej emisji poszczególnych zanieczyszczeń powstających podczas spalania [23]. W wyniku tego podziału można wyróżnić zanieczyszczenia: główne (CO_2), uboczne (NO_x , SO_2) i śladowe (węglowodory alifatyczne i aromatyczne, m.in. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, fenol, dioksyny i furany, niemetale i metale ciężkie). Zanieczyszczenia można podzielić również na:

- palne (niespalone paliwo, węglowodory z pirolizy, WWA, sadza, cyjanowodór i CO)
- produkty spalania (SO_2 , NO_x , popiół, CO_2) [4].

Emisja zanieczyszczeń zależy głównie od rodzaju spalanego paliwa. Na rysunku 1.6 porównano emisje NO_x , SO_2 i CO_2 podczas spalania gazu ziemnego, oleju i węgla przy założeniu, że wartość emisji dla węgla wynosi 100%. W wyniku wykorzystania węgla, jako dominującego paliwa w polskiej gospodarce energetycznej, powstaje charakterystyczna struktura emisji zanieczyszczeń. W tabeli 1.13 przedstawiony został procentowy udział poszczególnych sektorów w emisji SO_2 , NO_x , CO_2 oraz pyłów.



Rys. 1.5. Ważniejsze składniki spalin rzeczywistego procesu spalania [182]



Rys. 1.6. Charakterystyka emisji SO_2 , NO_x i CO_2 podczas spalania różnych paliw [64]

Tab. 1.13. Struktura zanieczyszczeń emitowanych do powietrza w Polsce [58]

Sektor	SO ₂ [%]	NO _x [%]	CO ₂ [%]	Pył [%]
Energetyka zawodowa	46	34	59	23
Energetyka przemysłowa	15	6	10	22
Przemysł	9	10	3	20
Komunalno-bytowy	28	12	20	35
Transport	2	38	8	0

1.3.1 Produkty gazowe

Dwutlenek węgla jest gazem nietrującym, jednak fakt ten nie sprawia, że jest on obojętny dla środowiska naturalnego. Co roku około 20 mld ton dwutlenku węgla dostaje się do atmosfery w wyniku spalania paliw. Stanowi to 10 ÷ 30 % całkowitej emisji CO₂. W Polsce roczna emisja dwutlenku węgla do powietrza w XXI w. utrzymuje się na poziomie ok. 320 mln ton (tab. 1.14).

Tab. 1.14. Całkowita emisja dwutlenku węgla w Polsce w wybranych latach [97]

Rok	2000	2005	2010	2015	2018	2019
Dwutlenek węgla [tys. ton]	317692	323385	334888	313419	336992	319521

Średnie stężenie CO₂ w powietrzu przez ostatnie 10 tys. lat utrzymywało się na poziomie poniżej 290 ppm. W XIX w. zaczęło ono wzrastać. W maju 2019 roku średnie stężenie CO₂ osiągnęło poziom 415 ppm. Istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że w jeszcze w XXI w. średnie stężenie CO₂ podwoi się. Zwiększenie zawartości CO₂ w atmosferze jest powodem wzrostu tzw. „efektu cieplarnianego”, który jest wywołany zaburzeniem równowagi radiacyjnej Ziemi [39]. Do powierzchni Ziemi dociera promieniowanie w zakresie widzialnym i bliskiego nadfioletu, które jest częściowo absorbowane. Ziemia, przy średniej temperaturze powierzchni około 288 K, promieniuje głównie w zakresie podczerwieni, w wyniku czego ustala się równowaga radiacyjna, której odpowiada temperatura 256 K [167]. Wzrost stężenia CO₂ w atmosferze powoduje wzrost pochłaniania energii promieniowanej przez Ziemię. Wynika to z faktu, że cząsteczki CO₂ pochłaniają promieniowanie w zakresie podczerwieni. W związku z tym następuje wzrost temperatury powierzchni Ziemi. Dwutlenek węgla odpowiada za około 50 % efektu cieplarnianego. Za pozostałą część odpowiedzialne są gazy takie jak: CH₄, N₂O, O₃ troposferyczny, freony i halony. W związku z tym, że wszystkie paliwa kopalne zawierają węgiel, ograniczenie emisji powstającego podczas spalania CO₂ jest trudne do uzyskania. Najskuteczniejszym sposobem zmniejszenia emisji CO₂ jest racjonalizacja energii i poprawa sprawności wytwarzania energii elektrycznej z paliw kopalnych. W związku z tym tak ważny jest rozwój nowych, sprawniejszych technologii użytkowania węgla, które zapewnią mniejszą emisję CO₂. W tabeli 1.15 porównane zostały wybrane technologie spalania węgla pod względem nominalnej mocy, sprawności, nakładu inwestycyjnego oraz emisji CO₂. Istnieje też możliwość zmniejszenia emisji CO₂ przez zmianę rodzaju spalanych paliw, ponieważ udziały atomów wodoru i węgla są w nich zróżnicowane. Spośród paliw kopalnych największy udział wodoru ma gaz ziemny zawierający głównie CH₄ i dlatego podczas jego spalania wytwarza się najmniej CO₂. Ropa naftowa zajmuje pozycję pośrednią, a najwięcej CO₂ jest wytwarzane podczas spalania węgla. W tabeli 1.16 porównano wartości ciepła spalania oraz jednostkowa emisja CO₂ podczas spalania wybranych paliw kopalnych.

Tab. 1.15. Jednostkowa emisja CO₂ podczas wytwarzania energii elektrycznej z zastosowaniem różnych technologii spalania węgla [146]

Technologia spalania	Nominalna moc [MW _e]	Sprawność [%]	Nakłady inwestycyjne [USD/kW _e]	Emisja [CO ₂ g/(kW _e h)]
Kocioł pyłowy z odsiarczaniem	200	38,8	1780	890
Kotły z cyrkulacją warstwową fluidalną	200	39,6	1490	880
Reaktor ciśnieniowy z cyrkulacją warstwą fluidalną	200	41,4	1460	850
Blok gazowo-parowy ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa	250	43,0	1520	780

Tab. 1.16. Jednostkowa emisja CO₂ podczas spalania wybranych paliw kopalnych [73]

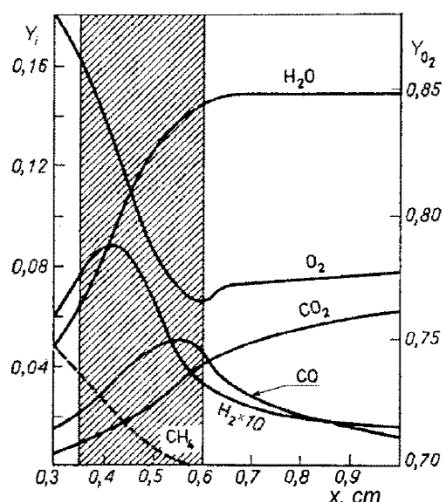
Rodzaj paliwa	Ciepło spalania, MJ/kg	Jedn. emisja, kgCO ₂ /GJ
Węgiel kamienny	29,5	94,6
Węgiel brunatny	12,5	101,2
Ropa naftowa	45,5	74,07
Gaz ziemny	53,7	56,1

Tlenek węgla w przeważającej części (ok. 60 ÷ 90 %) w atmosferze jest wynikiem naturalnego utleniania metanu w powietrzu. W Polsce tlenek węgla w 2019 r. pochodził głównie z procesów spalania paliw w sektorach, do których należą małe źródła spalania takie jak gospodarstwa domowe, instytucje, handel, usługi itp. Były one łącznie odpowiedzialne za 61 % całkowitej emisji krajowej CO. Innym znaczącym źródłem emisji tlenku węgla w 2019 r. był transport, z którym związane było 25 % emisji całkowitej. W stosunku do 2018 r. emisja CO zmniejszyła się o ok. 10 % (tab. 1.17) [97]. Antropogenna część emisji CO pochodzi głównie z tłokowych silników spalinowych, a w znacznie mniejszej części z różnego typu palenisk. Tlenek węgla jest gazem palnym, więc jego obecność w spalinach zmniejsza sprawność spalania. Zawartość CO w powietrzu wynosi średnio 0,12 ppm i zmienia się w szerokich granicach. Na przykład w lokalizacjach o zwiększonym ruchu motoryzacyjnym zawartość CO w powietrzu może sięgać 40 ppm. W dużym stężeniu tlenek węgla jest gazem silnie trującym, natomiast efekt dłuższej ekspozycji organizmów żywych na małe stężenie CO nie jest dobrze poznany [178].

Tab. 1.17. Całkowita emisja tlenku węgla w Polsce w XXI w. [97]

Rok	2000	2005	2010	2015	2018	2019
Tlenek węgla, [tys. ton]	3382	2961	2980	2230	2318	2112

Głównym, antropogennym źródłem CO w atmosferze jest niezupełne spalanie paliw kopalnych. W wyniku spalania węglowodorów w nich zawartych powstaje CO, które jest powoli utleniającym się półproduktem spalania. Na rysunku 1.7 przedstawiono obraz rozkładu stężeń reagentów w ubogim płomieniu gazowym CH₄/O₂ nad płaskim palnikiem.



Rys. 1.7. Profile stężenia składników substratów i produktów w płomieniu gazowym CH_4/O_2 dla nadciśnienia 10 kPa, w mol/mol [65]

Tłokowe silniki spalinowe pracują na składzie mieszanki bliskiej stechiometrycznej, lekko wzbogaconej, czego rezultatem jest udział w spalinach około 1 % CO. Zastosowanie ubogich mieszanek zmniejszyło zawartość CO tylko do około 0,5 % [43]. W szczytowym momencie cyklu pracy (2800K i 4 MPa) ustala się równowaga składników $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$ dla bilansu składników ze znacznym udziałem CO. W cyklach rozprężania temperatura gwałtownie spada i utlenianie CO według tej reakcji przebiega wolniej. W wyniku tego pomimo nadmiarowej zawartości tlenu w spalinach odnotowuje się duży udział CO w spalinach, stąd potrzeba stosowania katalizatorów [82].

Tlenki azotu powstające podczas spalania to N_2O , NO i NO_2 , odpowiednio tlenek diazotu, tlenek azotu i ditlenek azotu lub według starszej terminologii znane jako podtlenek, tlenek i dwutlenek azotu [64]. Podczas spalania najczęściej tlenków azotu powstaje w postaci NO z niewielkim tylko udziałem NO_2 (5 ÷ 10 %). W odniesieniu do tlenków azotu używa się pojęcia NO_x będącego mieszaniną tlenków NO i NO_2 (jako suma NO + NO_2 w przeliczeniu na NO_2) [61, 82]. Całkowitą roczną emisję NO_x na świecie ocenia się na ok. 55 mld ton, z czego ponad ok. 39 % powstaje w wyniku spalania paliw kopalnych [17]. W tabeli 1.18 porównano roczną emisję NO_x na świecie w zależności od źródła w ujęciu wagowym oraz procentowym.

Tab. 1.18. Roczna emisja NO_x na świecie [17]

Źródło	Emisja [mld ton/rok]	Udział [%]
Antropogenne:		
Spalanie paliw kopalnych	21	39
Spalanie biomasy	12	22
Rolnictwo	5	9
Razem	38	70
Naturalne	17	30
Razem	55	100

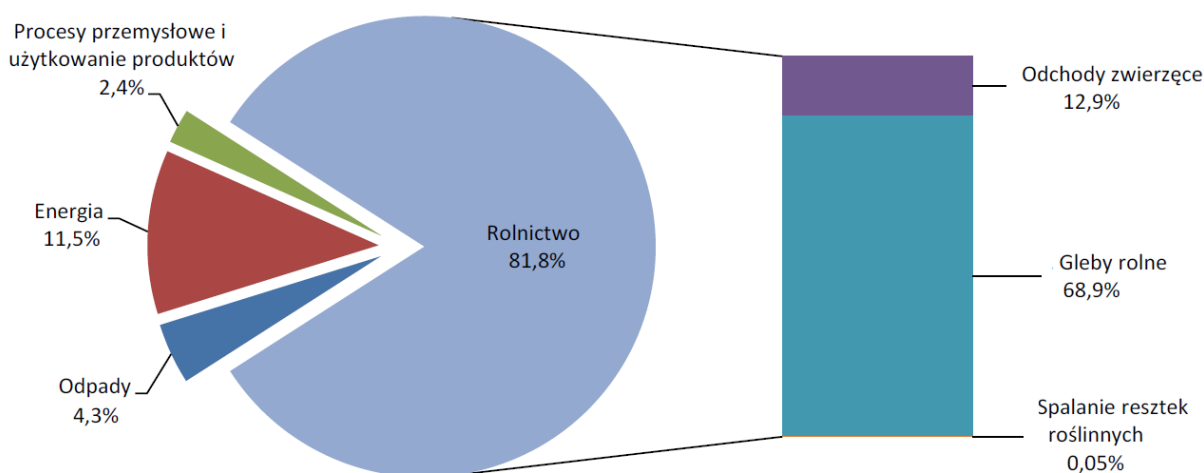
Tab. 1.19. Emisja tlenków azotu w Polsce w wybranych latach [69]

Źródło emisji wg kategorii NFR	1990	2005	2010	2019	2020
	[tys. ton]	[tys. ton]	[tys. ton]	[tys. ton]	[tys. ton]
Ogółem	1 128,07	862,34	838,17	628,07	593,90
1. Energia	1 012,84	779,06	751,64	539,32	502,43
A. Spalanie paliw	1 008,94	773,56	746,70	535,69	499,01
1. Przemysły energetyczne	579,40	304,13	280,11	137,54	124,45
2. Przemysł wytwórczy i budownictwo	69,09	64,16	54,08	53,35	50,93
3. Transport	214,32	220,95	252,37	230,72	210,56
4. Inne sektory	146,13	184,31	160,14	114,08	113,08
B. Emisja lotna z paliw	3,90	5,51	4,94	3,62	3,41
1. Lotna emisja z paliw stałych	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2. Lotna emisja z systemu gazu ziemnego i ropy naftowej	3,89	5,50	4,93	3,62	3,40
2. Procesy przemysłowe	12,98	15,99	15,43	17,30	17,52
A. Produkty mineralne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B. Przemysł chemiczny	8,00	13,63	13,04	14,64	15,06
C. Produkcja metali	4,28	1,42	1,39	1,63	1,42
D. Stosowanie rozpuszczalników i innych produktów	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G. – L. Inne	0,70	0,94	1,01	1,03	1,04
3. Rolnictwo	100,63	65,84	69,57	69,56	71,83
B. Nawozy naturalne	8,46	5,18	4,42	4,82	5,00
D. Gleby rolne	92,09	60,60	65,13	64,71	66,80
F. Spalanie resztek roślinnych	0,08	0,07	0,02	0,03	0,03
5. Odpady	1,62	1,44	1,53	1,89	2,13
A. Składowiska odpadów stałych	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C. Spopielenie i otwarte spalanie odpadów	1,62	1,44	1,53	1,89	2,13
D. Gospodarka ściekami	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E. Inne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

W Polsce roczna emisja tlenków azotu do lat dziewięćdziesiątych XX w. pozostawała na stałym poziomie ok. 1100 tys. ton [96]. Od końca lat 90-tych największym źródłem emisji tlenków azotu było spalanie paliw w transporcie drogowym, która rosła systematycznie do roku 2017. Wzrost emisji spowodowany był głównie zwiększeniem liczby pojazdów o 209 % od roku 1990 i zwiększeniem zużycia paliwa w tym benzyny, oleju napędowego, LPG (ang. Liquefied Petroleum Gas) i CNG (ang. Compressed Natural Gas). Spadek emisji NO_x od 2017 r. spowodowany był coraz większym udziałem w strukturze pojazdów spełniających najnowsze normy emisji Euro. W 2020 r. emisja w sektorze transportu obniżyła się w porównaniu do 2019 r. również z powodu niższego sumarycznego zużycia paliwa w transporcie drogowym o 4 % (w tym benzyny o 7 %, oleju napędowego o 3 %, LPG o 11 %) oraz w transporcie lotniczym o 57 %. Sumaryczna wielkość emisji tlenków azotu w roku 2020 zmalała o 5 % w stosunku do roku 2019. Spadek emisji NO_x o 10 % zaobserwowano również w sektorze energetyki zawodowej. Wynika z wdrożenia przez operatorów zaostrożonych standardów emisyjnych [69]. W tabeli 1.19 przedstawiono szczegółowe dane o wielkości emisji tlenków azotu według

klasyfikacji źródeł emisji NFR (ang. Nomenclature for Reporting) w poszczególnych sektorach w Polsce w wybranych latach. Czas przebywania NO_x w atmosferze w związku z ich samoistnymi procesami przetwarzania wynosi ok. 4 dni. Pomimo wysokiego nadmiaru tlenu w powietrzu, utlenianie NO w trójcząsteczkowej reakcji $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$ jest procesem powolnym. W związku z tym NO może utleniać się szybciej w reakcji dwucząsteczkowej $\text{NO} + \text{O}_3 = 2\text{NO}_2$ z cząsteczką ozonu, co jest bezpośrednią przyczyną powstawania dziury ozonowej [22]. Kolejnym problemem wynikającym z emisji tlenków azotu jest powstający w powietrzu w wyniku reakcji dwutlenku azotu z parą wodną kwas azotowy. Wspomniany kwas azotowy (HNO_3) wchodzi w skład kwaśnych deszczy, dlatego pierwszym efektem emisji NO_x jest spotęgowanie efektu zakwaszenia. Drugi ważny skutek obecności NO_x w atmosferze to powstawanie smogu fotochemicznego [64].

Spośród tlenków azotu w wyniku spalania najmniej powstaje *podtlenku azotu*. Zawartość N_2O w spalinach powstających w wyniku spalania oleju, gazu lub pyłu węglowego jest poniżej 5 ppm. Na świecie roczną emisję podtlenku azotu do atmosfery ocenia się na ok. 1000 mln ton. Około 30 % emisji pochodzi z procesów spalania, z czego ponad 80 % ze spalania węgla [46]. Pozostała część emisji N_2O pochodzi z naturalnych źródeł takich jak oceany, gleba oraz rozkładu nawozów. Zawartość N_2O przed 1800 r. ocenia się na poziomie ok. 280 ppb. W roku 2000 osiągnęła ona poziom ponad 320 ppb i co roku wzrastała $1 \div 4$ % w wyniku działań człowieka. W Polsce emisja podtlenku azotu w wyniku działalności człowieka w 2020 r. wyniosła 76,64 tys. ton. Emisja N_2O była o 31,8 % mniejsza niż w 1988 r. i o 3,8 % mniejsza niż w 2019 r. Emisja N_2O stanowiła 6,1 % całkowitej emisji gazów cieplarnianych 2020 r. Na rysunku 1.8 przedstawiony został udział w emisji N_2O wg głównych kategorii NFR [70].



Rys. 1.8. Emisja podtlenku azotu w 2020 r. według kategorii źródeł [opracowanie własne]

Podtlenek azotu nie stanowi bezpośredniego zagrożenia dla zdrowia człowieka i środowiska. Wynika to z faktu, że jest gazem mało reaktywnym i nie jest czynnikiem kwasotwórczym. Główne zagrożenie dla środowiska powstające z jego emisji wynika z faktu, że należy on do gazów cieplarnianych. Podtlenek azotu absorbuje 200 razy mocniej promieniowanie podczerwone, niż dwutlenek węgla i przedostając się do stratosfery w wyniku dyfuzji molekularnej, przyczynia się do niszczenia warstwy ozonowej.

Smog fotochemiczny zwany jest również smogiem typu Los Angeles. Najczęściej pojawia się on w miejscach z dużym nasłonecznieniem i intensywnym ruchem samochodowym. Przy dużym nasileniu smogu ludzie mogą odczuwać pieczenie oczu, a nawet wyczuwać zapach ozonu [96]. Głównymi zanieczyszczeniami powietrza związanymi ze smogiem fotochemicznym są ozon i pochodne węglowodorów, zawierające wiązania nadtlenowe. Za najważniejsze uważa się azotany: $\text{CH}_3 \cdot (\text{CO}) - \text{O} - \text{O} - \text{NO}_2$ i $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot (\text{CO}) - \text{O} - \text{O} - \text{NO}_2$ oraz połączenia hydroperoksydowe typu $\text{R}(\text{CO}) - \text{O} - \text{O} - \text{H}$ [96]. Poza tym występują również aldehydy: mrówkowy i octowy, które są charakterystyczne dla niskotemperaturowego utleniania węglowodorów [9]. Związki chemiczne charakterystyczne dla smogu powstają w wyniku złożonych procesów chemicznych wynikających

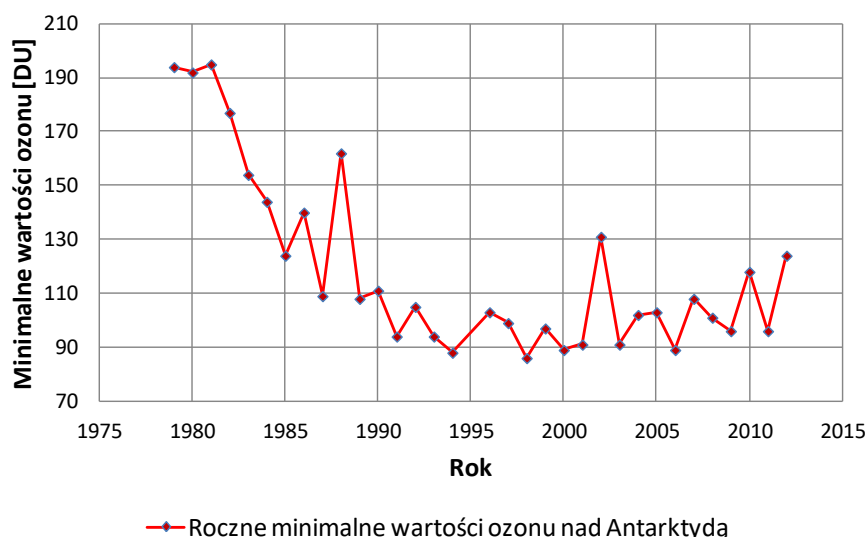
z obecności NO, węglowodorów i CO w powietrzu emitowanych z silników spalinowych [22]. W wyniku nie docierania odpowiednio energetycznego promieniowania UV do troposfery ozon nie może powstać w wyniku fotolizy tlenu atomowego. Dlatego za główną przyczynę powstawania O₃ w troposferze uważa się fotolizę NO₂, która zachodzi dla fal o długościach poniżej 400 nm w reakcjach: NO₂ + hv → NO + O oraz O₂ + O + M = O₃ + M. Stężenie O₃ wynikające ze stanu ustalonego podanych reakcji, rośnie wraz z nasłonecznieniem i stosunkiem stężeń [NO₂]/[NO] wynikającego z obecności spalin w powietrzu [22].

Według raportu Ochrony Środowiska 2021 poziom docelowy dla ozonu, ustanowiony ze względu na ochronę zdrowia ludzi i ochronę roślin, w celu unikania, zapobiegania lub ograniczania szkodliwego wpływu ozonu na zdrowie ludzi lub środowisko jako całość, określono na 120 µg/m³. Przekroczenia stężenia docelowego ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery odnotowano w 2020 r. na wielu stanowiskach pomiarowych w całej Polsce. Podstawą klasyfikacji była liczba dni ze stężeniem 8-godzinnym przewyższającym 120 µg/m³. Dopuszczalna liczba dni z przekroczeniami dopuszczalnego poziomu w danym roku kalendarzowym wynosiła 25 dni (średnio dla 3 lat). Najwyższe stężenie maksymalne (8-godzinne) zanotowano w Szczecinie (woj. zachodniopomorskie), gdzie wyniosło ono 156 µg/m³, na podmiejskim stanowisku pomiarowym w woj. dolnośląskim – we Wrocławiu (154 µg/m³) oraz w woj. lubuskim – w Żarach (152 µg/m³). Największą liczbę dni z przekroczeniami stężenia docelowego ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery odnotowano w 2020 r. na stanowiskach pomiarowych województwa dolnośląskiego (we Wrocławiu) i województwa lubuskiego (w Żarach) – po 22 dni [97]. W tabeli 1.20 przedstawiono wyniki pomiarów maksymalnego stężenia ozonu oraz liczbę dni, w których przekroczona została wartość stężenia docelowego ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery. Badania przeprowadzono w 2020 r. na stanowiskach pomiarowych rozmieszczonych na terenie Polski.

Tab. 1.20. Stężenie ozonu w przyziemnej warstwie atmosfery w 2020 r. [97]

Lokalizacja stanowisk pomiarowych		Stężenie maksymalne		Liczba dni z przekroczeniami stężenia docelowego
		1-godzinne	8-godzinne	
		µg/m ³		
Dolnośląskie	Wrocław	158	148	22
Kujawsko-pomorskie	Ciechocinek	177	137	6
Lubelskie	Lublin	136	129	4
Lubelskie	Lubuskie	155	152	22
Łódzkie	Łódź	154	145	7
Małopolskie	Trzebinia	155	142	9
Mazowieckie	Warszawa	155	144	7
Opolskie	Opole	147	133	5
Podkarpackie	Przemyśl	139	131	6
Podlaskie	Białystok	141	127	1
Pomorskie	Łeba	139	131	4
Śląskie	Złoty Potok	157	144	9
Świętokrzyskie	Nowiny	153	144	5
Warmińsko-mazurskie	Ostróda	140	126	3
Wielkopolskie	Krzyżówka	156	145	6
Zachodniopomorskie	Szczecin	170	156	14

Ozon w atmosferze chroni życie na Ziemi przed zabójczym promieniowaniem UV ($\lambda < 310$ nm). Od ponad 15 lat obserwuje się zmniejszanie udziału ozonu w stratosferze [47]. Na rysunku 1.9 przedstawiono wykres rocznych minimum ozonu nad Antarktydą. Na początku XXI w. zaobserwowano spadek udziału O₃ nad Antarktydą o ok. 50 % od 1980 r.

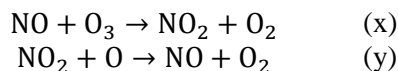


Rys. 1.9. Roczne minimalne wartości ozonu nad Antarktydą [opracowanie własne]

Obszary takie określa się mianem tzw. dziury ozonowej. Dziura ozonowa jest określana jako region, w którym grubość warstwy ozonu jest mniejsza niż 220 DU (ang. Dobson Unit). Jednostka Dobsona służy do pomiaru grubości warstwy ozonu w atmosferze Ziemi, w szczególności w stratosferze. Pomiary zostały wykonane przez: 1979-1992 Nimbus 7 TOMS; 1993-1994 Meteor 3 TOMS; 1995 (brak satelity na orbicie); 1996-2004 Earth Probe TOMS; 2005-2012 OMI.

Najważniejsze drogi destrukcji O_3 w stratosferze to:

- fotoliza O_3 i reakcje z rodnikami O ,
- reakcje z udziałem rodników OH i HO_2 ,
- reakcje z udziałem Cl i ClO oraz Br i BrO ,
- reakcje z NO :



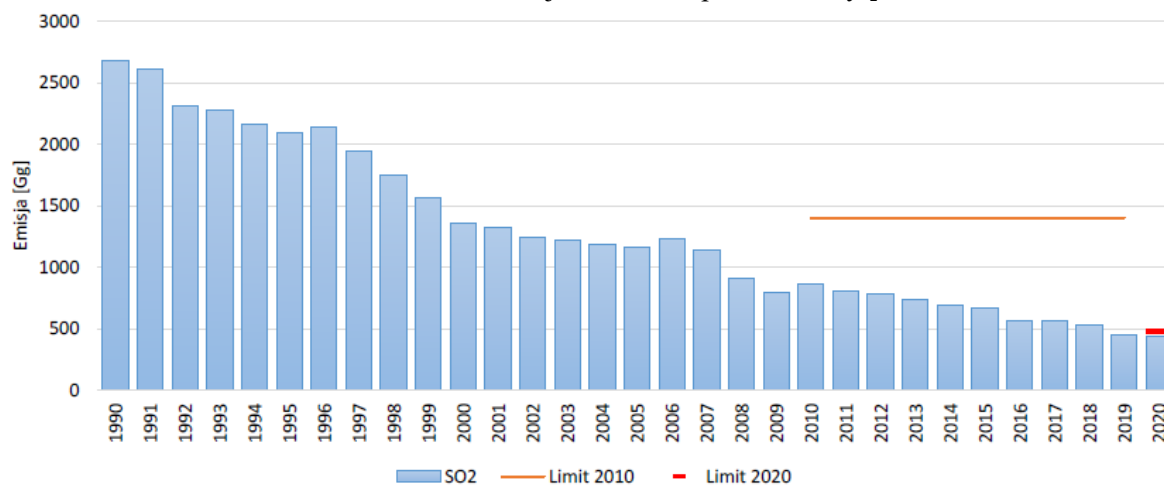
Najistotniejsze jest to, że natura reakcji b), c) i d) to procesy katalityczne, tzn. że reagenty OH , Cl lub NO nie zużywają się, bo są w każdym cyklu odtwarzane. Rodniki OH i HO_2 występują w stratosferze naturalnie, natomiast obecność Cl i Br , a częściowo i NO można przypisać działalności człowieka [167]. Jednak szansa bezpośredniego przedostania się NO_x powstałego w wyniku spalania do troposfery jest mała, dlatego, że NO utlenia się, a NO_2 jest reaktywny, w związku z czym czas jego przebywania w powietrzu jest krótki. Z kolei N_2O jest mało reaktywny i przebywa w atmosferze ok. $150 \div 160$ lat, w wyniku czego przedostaje się do stratosfery, gdzie ulega przemianom w tlenek azotu zgodnie z reakcją $N_2O + O \rightarrow 2NO$, a powstałe w ten sposób NO i NO_2 zużywają ozon w reakcjach (x, y).

Tlenki siarki powstają w wyniku spalania paliw kopalnych. Roczna emisja dwutlenku siarki do atmosfery na świecie wynosi ok. 200 mln ton w przeliczeniu na siarkę [39]. Porównywalna ilość siarki emitowana jest do atmosfery w naturalnych procesach takich jak:

- procesy gnilne (głównie H_2S),
- emisja z wulkanów,
- emisja z nad oceanów w postaci aerozoli siarczanów.

W wyniku długiego czasu przebywania dwutlenku siarki w atmosferze oraz podczas suchej pogody SO_2 może się przemieszczać na duże odległości, dlatego podczas wyznaczania wielkości emisji zanieczyszczeń w danym kraju należy uwzględnić jego eksport i import. Wartość emisji SO_2 zmniejszyła się o 84 % od roku 1990 do roku 2020. Zmiany zapoczątkowane były przez załamanie się przemysłu ciężkiego w końcu lat 80-tych i na początku lat 90-tych XX w. Do zmniejszenia się emisji tego zanieczyszczenia przyczynił się również stopniowy spadek udziału węgla kamiennego i brunatnego w paliwach stosowanych do produkcji ciepła i energii elektrycznej. Trend emisji w Polsce w latach 1990-2020 przedstawiono na rysunku 1.10, na którym zaznaczony został limit

emisji określonym w dyrektywie 2001/81/WE, według której najpóźniej do roku 2010 Polska miała ograniczyć roczną emisję SO₂ do ilości nie większej niż 1397 tys. ton. Limit ten został spełniony w okresie 2010 ÷ 2019. W roku 2020 limit emisji SO₂ został przekroczony [69].



Rys. 1.10. Trend emisji SO₂ w Polsce latach 1990-2020 [69]

Na spadek emisji SO₂ w Polsce w ostatnich latach wpłynęło zmniejszenie emisji w sektorze energetyki zawodowej. Wynikało to z konieczności dostosowania się przez operatorów od 1 stycznia 2016 r. do wymagań dyrektywy 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych w zakresie zaostrzonych standardów emisji SO₂, NO_x oraz pyłu całkowitego [34]. Podjęto również działania mające na celu dostosowanie się tzw. dużych obiektów energetycznego spalania paliw do wymagań określonych w decyzji Komisji UE 2017/1442 z dnia 31.07.2017 r. w konkluzjach dotyczących najlepszych dostępnych technik BAT (ang. Best Available Technology) [29]. W tabeli 1.21 przedstawiono dane o wielkości emisji dwutlenku siarki według klasyfikacji źródeł emisji NFR w poszczególnych sektorach w Polsce w wybranych latach. Około 95 % siarki zawartej w węglu jest utleniane podczas spalania do SO₂. Dalsze utlenianie dwutlenku siarki następuje w powietrzu w następującej reakcji $2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$. Proces ten jednak w warunkach normalnych zachodzi bardzo powoli. SO₂ głównie utlenia się z udziałem wolnych rodników takich jak OH i HO₂ wg. reakcji: $SO_2 + OH \rightarrow$ (pośrednie stadia) $\rightarrow SO_3$ oraz $SO_2 + HO_2 \rightarrow SO_3 + OH$. Następnie SO₃ wchodzi w reakcję z wodą zawartą w powietrzu w postaci pary wodnej lub kropeł wody w chmurach, w wyniku której powstaje kwas siarkowy. Trójtlenek siarki wchodzi również często w reakcje z pyłami zawierającymi tlenki metali i tworzy siarczany. Procesy te przebiegają wolno, w związku z tym czas przebywania SO₂ w atmosferze trwa od 24 godzin do 4 dni.

Emisja tlenków siarki ma negatywny wpływ na zdrowie człowieka oraz stan środowiska. Już udział 0,1 ppm SO₂ w powietrzu utrudnia oddychanie, wywołuje choroby oskrzeli i niszczy rośliny powodując wybielanie liści [23]. Drugim ważnym negatywnym efektem emisji SO₂ są kwaśne deszcze, które prowadzą do zwiększenia kwasowości zbiorników wodnych oraz wód gruntowych. W wyniku tego następuje wypłukiwanie potasu z gleby, co obniża jej żyzność, a ponadto sprzyja przechodzeniu do wód trujących metali ciężkich, których siarczany są na ogół dobrze rozpuszczalne. Podrażnienie dróg oddechowych kwasem siarkowym jest 4 ÷ 20 razy większe od spowodowanego równoważną ilością SO₂, który po dostaniu się do płuc niszczy tkankę układu oddechowego. Prowadzi to stopniowo do zubożenia życia zwierzęcego, aż do jego wyeliminowania [179]. Kolejne zagrożenia w wyniku emisji tlenków siarki wynikają z ich korozyjnych właściwości. Powodują utrudnienia w zakresie eksploatacji turbin gazowych oraz urządzeń kotłowych. W wyniku spalania węgla w kotłach na paliwo stałe powstaje niewielka ilość SO₃ oscylująca w granicach od 0,5 do 3 % całkowitej ilości tlenków siarki. Po przekroczeniu punktu rosy dla roztworu kwasu siarkowego następuje jego kondensacja. Krople kwasu siarkowego osiadają na cząstkach popiołu, w wyniku czego H₂SO₄ jest neutralizowany przez alkaliczne składniki popiołu. Obecność SO₂ w spalinach w instalacji kotłowej ma również dodatnie efekty. Niewielki udział SO₂ w spalinach (10 ÷ 20 ppm) pozwala 10 ÷ 100 razy zmniejszyć rezystywność popiołu, co w przypadku wysoko rezystywnych popiołów jest niezbędnym czynnikiem efektywnego odpylania. Z tego powodu, w celu poprawy

skuteczności działania elektrofiltrów. zwiększa się nawet w sposób sztuczny udział SO₂ w spalinach, przez katalitycznie utlenianie SO₂ lub dodatkowo poprzez spalanie siarki [74, 86].

Tab. 1.21. Emisja dwutlenku siarki w Polsce w wybranych latach [69]

Źródło emisji wg kategorii NFR	1990	2005	2010	2019	2020
	[tys. ton]	[tys. ton]	[tys. ton]	[tys. ton]	[tys. ton]
Ogółem	2 679,32	1 160,17	859,99	444,69	431,88
1. Energia	2 671,88	1 150,96	850,78	434,57	421,99
A. Spalanie paliw	2 662,75	1 138,07	842,67	427,92	415,18
1. Przemysły energetyczne	2 244,81	842,95	508,28	192,46	182,76
2. Przemysł wytwórczy i budownictwo	163,53	111,90	99,21	84,97	75,90
3. Transport	45,25	1,24	0,56	0,75	0,64
4. Inne sektory	209,16	181,97	234,63	149,75	155,89
B. Emisja lotna z paliw	9,12	12,89	8,11	6,64	6,80
1. Lotna emisja z paliw stałych	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2. Lotna emisja z systemu gazu ziemnego i ropy naftowej	9,11	12,89	8,10	6,64	6,80
2. Procesy przemysłowe	7,35	9,13	9,15	10,02	9,79
A. Produkty mineralne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B. Przemysł chemiczny	4,06	4,40	4,25	4,70	4,37
C. Produkcja metali	2,07	2,77	2,62	2,73	2,78
D. Stosowanie rozpuszczalników i innych produktów	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G. – L. Inne	1,23	1,96	2,29	2,58	2,63
3. Rolnictwo	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01
B. Nawozy naturalne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D. Gleby rolne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F. Spalanie resztek roślinnych	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01
5. Odpady	0,07	0,06	0,06	0,10	0,10
A. Składowiska odpadów stałych	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C. Spoielanie i otwarte spalanie odpadów	0,07	0,06	0,06	0,10	0,10
D. Gospodarka ściekami	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E. Inne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Węglowodory powstają w wyniku procesów naturalnych, a ich roczna emisja wynosi ok. 30 ÷ 60 mln ton rocznie [23]. Emisja CH w wyniku działalności człowieka jest spowodowana przede wszystkim niezpełnym spalaniem, parowaniem paliw, stratami z sieci gazowniczych i stosowaniem rozpuszczalników węglowodorowych. Wśród węglowodorów emitowanych do powietrza główny udział ma metan. Pochodzi on przede wszystkim z naturalnych procesów gnilnych, hodowli bydła i uprawy ryżu. Aktualnie poziom zawartości CH, w powietrzu atmosferycznym wynosi ok. 1,7 ppm i wykazuje on tendencję wzrostową [179]. Metan jest wysoko efektywnym gazem cieplarnianym. Dla przykładu absorbuje promieniowanie podczerwone o ok. 60 razy bardziej w ujęciu wagowym od CO₂ [39]. Głównym źródłem emisji węglowodorów w technice jest motoryzacja. Pierwszym powodem są

operacje związane z transportem oraz dystrybucją paliw płynnych, w wyniku których węglowodory przedostają się do powietrza atmosferycznego. Drugim ważnym źródłem emisji węglodorów do powietrza jest ich powstawanie w wyniku spalania paliw w spalinowych silnikach tłokowych, które jest spowodowane:

- gaszącym oddziaływaniem zimnej ściany cylindra na płomień,
- niedokładnym wymieszaniem paliwa z powietrzem,
- rozkładem oleju smarującego ściany cylindra,
- brakiem spalania w przestrzeni między pierścieniami tłoka [173].

Emisja węglodorów w wyniku spalania węgla w kotłach energetycznych ma niewielki udział w całkowitej emisji CH do atmosfery (ok. 0,5 %). Emitowane węglowodory dzielą się na:

- lekkie węglowodory, emitowane jako gazy i pary,
- ciężkie węglowodory, emitowane w postaci aerozoli lub zaabsorbowane na powierzchni cząstek popiołu.

Obecność węglodorów w troposferze jest jednym z czynników powstawania smogu fotochemicznego. Zostało to już dokładniej omówione w podrozdziale dotyczącym tlenków azotu. W powietrzu węglowodory ulegają niskotemperaturowemu utlenianiu z powstawaniem nadtlenków i wodoronadtlenków organicznych oraz rodników HO, które reagując z NO_x przyczyniają się pośrednio do wytwarzania ozonu. Przede wszystkim zagrożenie stanowią emisje wielopierścieniowych węglodorów aromatycznych WWA.

Węglowodory aromatyczne (areny). Benzen (C_6H_6) jest pierścieniem 6-członowym atomów węgla będącym najprostszym związkiem aromatycznym oraz podstawową tzw. jednostką w strukturach cząsteczek węglodorów aromatycznych (rys. 1.11) [85].

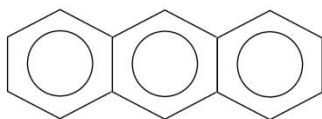


Rys. 1.11. Wzór strukturalny benzenu [64]

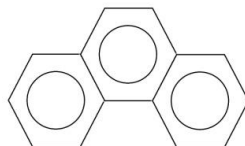
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) to układy skondensowane do cząsteczek wielopierścieniowych węglodorów aromatycznych, które są zbudowane z dwóch lub więcej pierścieni benzenowych, połączonych ze sobą krawędziami (rys. 1.12) [85].



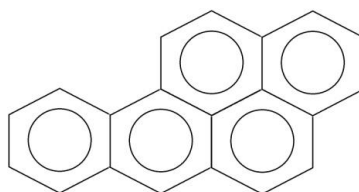
Naftalen



Antracenu



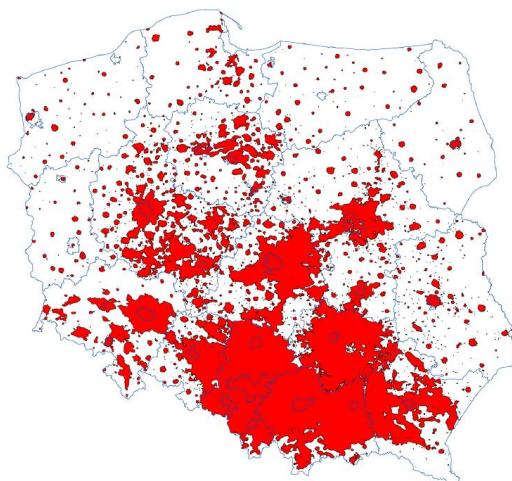
Fenantren



Benzo(α)pirenu

Rys. 1.12. Wzory strukturalne naftalen, antracenu, fenantrenu oraz benzo(α)pirenu [64]

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne należą do grupy wyróżniających się toksykantów. Najbardziej znanym przedstawicielem grupy toksykantów jest benzo(α)piren. Wynika to z ich kancerogennych właściwości wpływających na ich biologiczną aktywność [71, 176]. W ocenie jakości powietrza wskaźnikiem poziomu zanieczyszczenia powietrza WWA jest benzo(α)piren oznaczany w pyłe zawieszonym PM10. Wartością normowaną dla tego zanieczyszczenia jest poziom docelowy wynoszący 1 ng/m³. Według raportu Stan Środowiska w Polsce 2018 [139] spośród krajów Unii Europejskiej skala przekroczeń normy jakości powietrza w Polsce w odniesieniu do benzo(α)pirenu jest największa. Przekroczenia występują we wszystkich województwach, przy czym najwyższe stężenia tego zanieczyszczenia odnotowano w południowej i centralnej Polsce. Rejony przekroczeń obejmują prawie cały obszar województw: małopolskiego, śląskiego i świętokrzyskiego oraz znaczne obszary województwa opolskiego, podkarpackiego, łódzkiego, dolnośląskiego, mazowieckiego i wielkopolskiego (rys. 1.13).



Rys. 1.13. Obszary przekroczeń poziomu benzo(α)pirenu w pyłe PM10 w powietrzu za rok 2017 [81]

Najwyższe średnie roczne stężenie benzo(α)pirenu w roku 2017 odnotowano na stacji pomiarowej w województwie małopolskim w miejscowości Brzeszcze (22,7 ng/m³), bardzo wysokie stężenia tego zanieczyszczenia przekraczające 10 ng/m³ wystąpiły również w Rybniku (16 ng/m³), Nowej Rudzie (15,9 ng/m³), Nowym Targu (14,6 ng/m³), Pszczynie (14,5 ng/m³) i Żywcu (12,3 ng/m³) [139]. Źródło występowania wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w środowisku naturalnym możemy podzielić na naturalne i antropogenne. naturalne źródła WWA to:

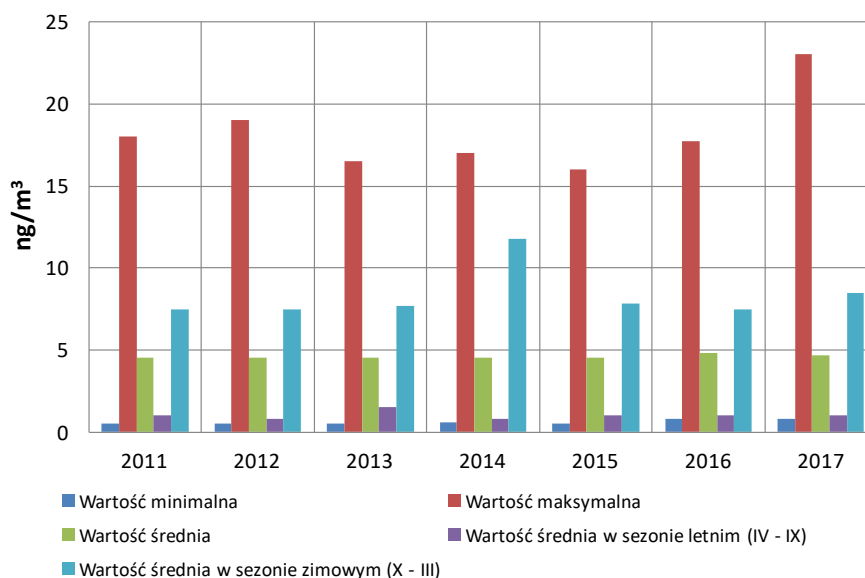
- procesy geochemiczne, których produktem są ropa naftowa, łupki bitumiczne, torf itp. [173],
- naturalne procesy pirolizy (działanie wulkanów, pożary lasów i prerii),
- procesy biologicznej syntezy (rośliny, gleby i bakterie wykazują zdolność do ich syntezowania).

Głównym antropogennym źródłem węglowodorów aromatycznych jest piroliza węgla. Na przykład smoła pogazowa zawiera ponad 200 związków aromatycznych. Węglowodory aromatyczne są obecne również we frakcji C₆ – C₁₀ ropy naftowej przetwarzanej podczas katalitycznego reformingu [65]. Wielkość emisji WWA wyniku spalania jest związana z rodzajem spalanych paliw. Na emisję WWA wpływa głównie obecność w paliwie węglowodorów aromatycznych takich jak smoła i jej pochodne, benzyna i oleje zawierających frakcje aromatyczne. Powstające w wyniku działalności człowieka WWA pochodzą z:

- domowych pieców (przestarzałe konstrukcje i zła eksploatacja),
- małych kotłów węglowych (niedopał gazowych i ciekłych produktów pirolizy węgla),
- koksowni,
- tłokowych silników spalinowych podczas rozruchu, zła organizacja procesu spalania brak systemów katalitycznego oczyszczania spalin,
- złą jakością palników olejowych.

Ponieważ źródłem zanieczyszczenia powietrza benzo(α)pirenem jest niepełne spalanie paliw, najwyższe stężenia benzo(α)pirenu i innych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych występują w okresie jesienno-zimowym na gęsto zabudowanych obszarach, na których domy lub

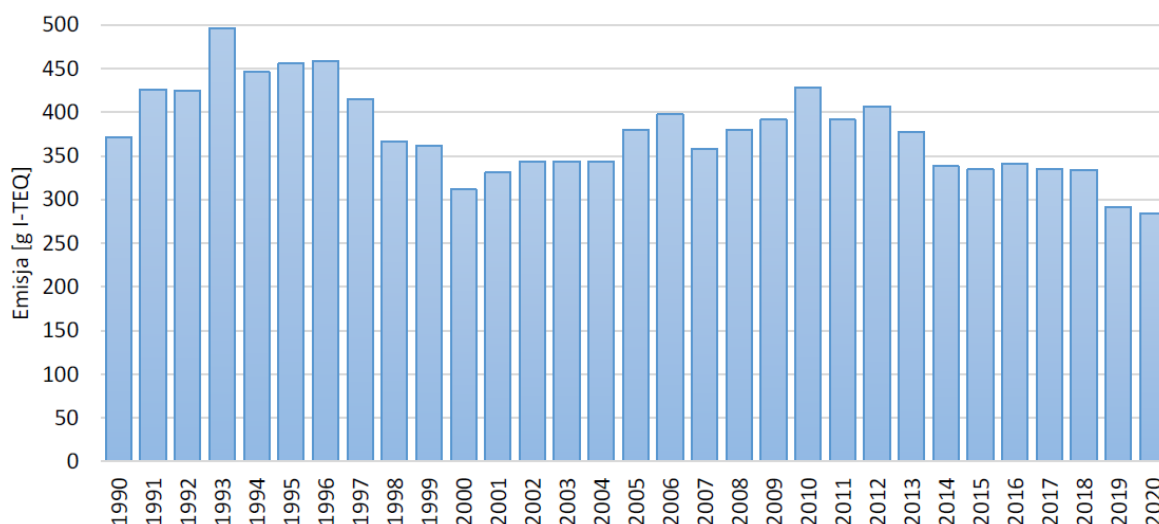
mieszkania są ogrzewane indywidualnie węglem lub drewnem. Na rysunku 1.14 przedstawione zostało średnie roczne stężenie benzo(α)pirenu w pyłe PM10 obliczone z rocznych serii pomiarowych ze wszystkich stanowisk pomiarowych funkcjonujących w ramach PMŚ w latach 2011–2017 w Polsce.



Rys. 1.14. Średnie roczne stężenia benzo(α)pirenu w pyłe PM10 w latach 2011–2017 w Polsce [opracowanie własne]

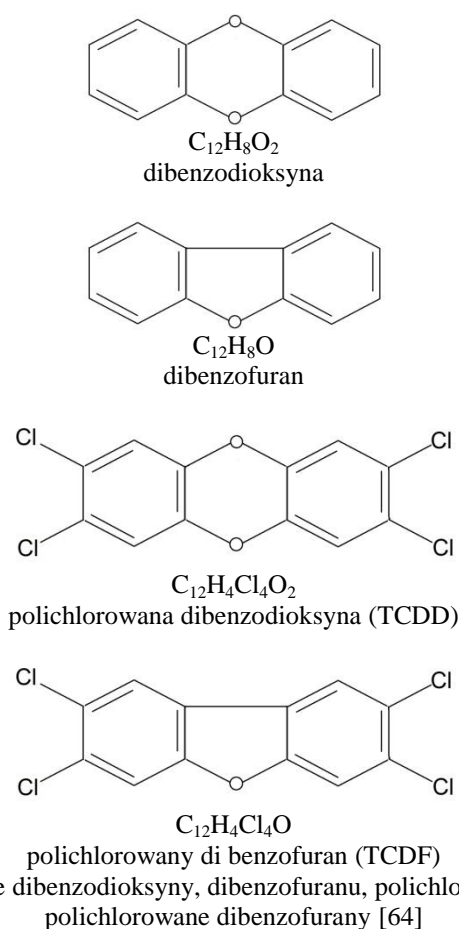
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne powstają również jako niepożądany produkt niepełnego spalania paliw kopalnych np. węgla i oleju [71, 171]. Opuszczają komory spalania w postaci pary lub aerozolu oraz zaadsorbowane na cząstkach sadzy. Najprostszym sposobem zmniejszenia ich emisji jest zapewnienie odpowiedniego czasu przebywania w płomieniu w atmosferze utleniającej. Łatwo też ulegają katalitycznemu utlenianiu na katalizatorze platynowym [89]. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne znajdują się we wszystkich elementach naturalnego środowiska człowieka, tj. w powietrzu, glebie, wodzie pitnej, roślinach, żywności np. produktach wędzonych. Dlatego kontakt z nimi ma charakter powszechny [179]. Zagrożenie jest spowodowane faktem, że emisja WWA w wyniku działalności człowieka osiągnęła poziom, w wyniku którego zachwiana została równowaga między naturalnymi procesami wytwarzania i degradacji WWA. Wynikiem jest wzrost stężenia WWA w środowisku nawet do kilkuset razy [23, 71, 179].

Dioksyny i furany uważane są za najbardziej toksyczne substancje powstające podczas spalania. Są niezwykle niebezpieczne dla zdrowia człowieka. Już w niewielkich dawkach mają działanie rakotwórcze. W większych dawkach mogą spowodować uszkodzenie organów takich jak np. grasica, wątroba czy śledziona, a nawet śmierć. [179]. Emisja dioksyn i furanów w 2020 r. zmniejszyła się o 24 % od 1990 roku. Zmiany emisji między kolejnymi latami w poszczególnych sektorach wynikają głównie ze zmian aktywności (np. zużycia paliw, liczby pożarów) oraz zmian w technologiach spalania, które wpływają na zastosowane w obliczeniach wskaźniki emisji (rys. 2.13) [69]. Dioksyny i furany występują w środowisku najczęściej w postaci mieszanin kongenerów, różniących się między sobą poziomem toksyczności. Aby określić całkowity poziom toksyczności mieszaniny dwóch lub więcej różnych kongenerów, używa się z kolei tzw. równoważnika toksyczności TEQ (ang. Toxic Equivalency). Stanowi on sumę iloczynów zawartości masowych poszczególnych składników analizowanej mieszaniny oraz przypisanych im jednostkowych współczynników TEF (ang. Toxic Equivalency Factor) [19, 141]. Jest to wartość masowa, która na rysunku 1.15 została wyrażona w gramach w latach 1990-2020.



Rys. 1.15. Trend emisji dioksyn i furanów w latach 1990-2020 [69]

Cząsteczka dioksyny posiada wzór $C_{12}H_8O_2$. W jej skład wchodzi dwa pierścienie benzenowe (C_6H_4) połączone ze sobą przez dwa atomy tlenu wiązaniem $C - O - C$. Z kolei cząsteczka furanu posiada wzór $C_{12}H_8O$. Podobnie jak cząsteczka dioksyny, jest zbudowana z dwóch pierścieni aromatycznych, ale połączona jest wiązaniami $C - O - C$ i $C - C$ (rys. 2.9) [85]. W przypadku zastąpienia więcej niż jednego atomu H przez atomy Cl w dibenzodioksynie i dibenzofuranie powstaną polichlorowane: dibenzodioksyny (PCDDs) i dibenzofurany (PCDFs), które nazywane są inaczej „dioksynami” oraz „furanami”. Spośród ich licznych izomerów za najsilniej toksyczny uważany jest izomer 2,3,7,8 tetrachlorodioksyny posiadający wzór $C_{12}H_4Cl_4O_2$, oznaczony przez TCDD. Jego odpowiednikiem wśród furanów jest izomer tetrachlorodibenzofuran posiadający wzór $C_{12}H_4Cl_4O$, oznaczany TCDF (rys. 1.16).

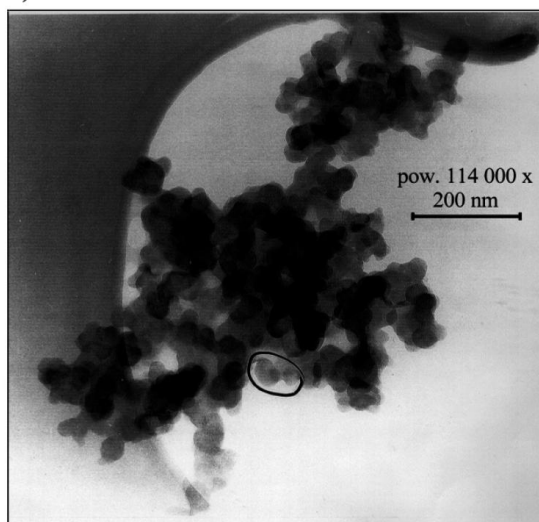


Rys. 1.16. Wzory strukturalne dibenzodioksyny, dibenzofuranu, polichlorowane dibenzodioksyny oraz polichlorowane dibenzofurany [64]

Dioksyny i furany powstają w stosunkowo niskich temperaturach oscylujących w granicach od 400 do 600 °C. Wynika to z faktu, że są związkami organicznymi i nie mogą istnieć w temperaturach wyższych, niż 600 °C. Powstają one raczej w warunkach pirolizy, a nie spalania dlatego w konwencjonalnych kotłach energetycznych, w których czas przebywania w strefie wysokich temperatur jest duży, prawdopodobieństwo tworzenia się dioksyn i furanów jest bardzo małe [23]. Za główną przyczynę emisji dioksyn i furanów w wyniku działalności człowieka w Polsce uważa się procesy spiekania w hutnictwie oraz procesy zachodzące w spalarni śmieci [36]. Syntezowanie ich w warunkach temperatury mieszczącej się w granicach od 400 do 600 °C możliwe jest przez chlorowanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania drewna i węgla [43]. Przy udziale chlorowodoru w spalinach, w niskiej temperaturze (ok. 300 °C) dioksyny i furany mogą powstawać na cząstkach popiołu zawierających związki metali [23].

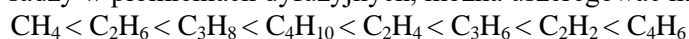
1.3.2. Produkty stałe

Sadza powstaje w wyniku spalania węglowodorów. Jej obecność w płomieniu możemy zaobserwować w postaci świecących się na żółto jasnych cząsteczek sadzy. Zaletą powstawania sadzy jest jej intensywne promieniowanie, w wyniku którego płomień większą swoją zdolność do przekazywania ciepła. Jest to wykorzystywane np. w technologiach spalania gazu [56]. Z kolei problemem wynikającym z powstawania sadzy jest jej obecność w spalinach, która powoduje obniżenie sprawności spalania oraz negatywnie wpływa na środowisko zanieczyszczając atmosferę. Głównym zagrożeniem sadzy dla zdrowia człowieka jest kondensowanie się na jej cząstkach WWA. Sadza składa się przede wszystkim z węgla (94 ÷ 99 %), wodoru (0.5 ÷ 3 % wag.) oraz ze śladowych ilości tlenu, azotu i siarki. Powstaje ona w płomieniu w wyniku pirolizy węglowodorów przy niedoborze tlenu. Wartość krytyczna współczynnika C/O, podczas którego zauważa się powstawanie sadzy w płomieniu wynosi $C/O \approx 0,5$. Czynniki, które przede wszystkim wpływają na powstawanie sadzy to: temperatura, rodzaj paliwa (C/H) i stosunek C/O w mieszance palnej, czas reakcji, rodzaj płomienia (kinetyczny, dyfuzyjny) oraz obecność jonów i pól elektrycznych. W zależności od wymienionych czynników cząsteczki sadzy mogą mieć rozmiar od 1 do 100 nm (rys. 1.17). Sadza jest substancją sypką oraz pylistą, w związku z tym łatwo unosi się w powietrzu, a dym pełni funkcję aerozolu w spalinach.

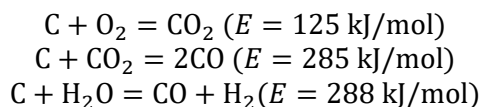


Rys. 1.17. Cząsteczki sadzy połączone w łańcuchy (pow. 114 000) [134]

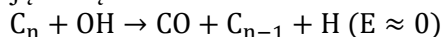
Wpływ na powstawanie sadzy w płomieniu ma również wzrost masy cząsteczkowej spalanego węglowodoru i stosunku C/H w paliwie. Węglowodory wykorzystywane w przemyśle, wpływające na wzrost tworzenia się sadzy w płomieniach dyfuzyjnych, można uszeregować następująco:



Sadza, podobnie jak grafit i koks, w odpowiednio wysokiej temperaturze utlenia się w kontakcie z tlenem, dwutlenkiem węgla i parą wodną [78]. Przedstawiają to następujące równania stechiometryczne:



Okazuje się jednak, że energia aktywacji tych reakcji jest duża, dlatego w płomieniu duży wpływ na szybkość utleniania sadzy mają stężenia aktywnych wolnych rodników, a zwłaszcza rodników hydroksylowych OH, które atakują sadzę.



Z powodu znacznego udziału rodników OH podczas spalania węglowodorów mniejsze cząstki sadzy są szybko utleniane w płomieniu, a większe cząstki są głównie dopalane w strefie popłomiennej z udziałem tlenu molekularnego [38]. Problem powstawania sadzy dotyczy głównie kotłów małej mocy. W przypadku kotłów dużych mocy czas przebywania sadzy jest wystarczający, żeby cząsteczki sadzy zdążyły się spalić. Sposobami na ograniczenie emisji sadzy jest konstrukcja kotłów z wtórną strefą spalania, zapewniającą odpowiedni czas przebywania ok. 2 s, znaczny nadmiar powietrza na poziomie współczynnika $\lambda = 1,2 \div 1,5$ oraz wysoką temperaturę (1300 \div 1800 K).

Koks powstaje w wyniku spalania węgla oraz oleju, który tworzy tzw. pozostałość stałą. Podzielić go można na koks olejowy oraz koksik węglowy.

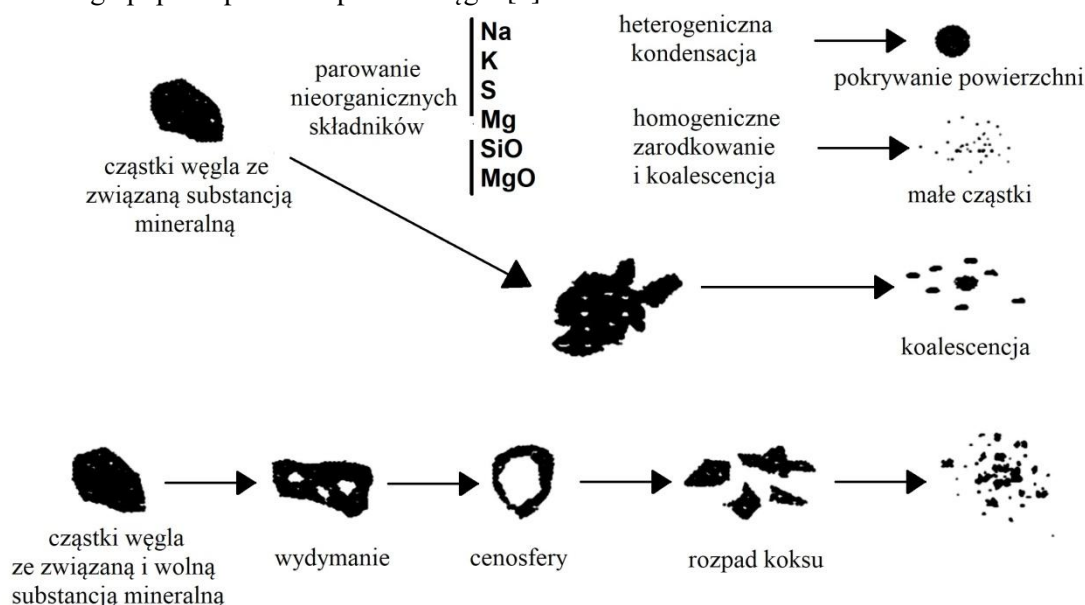
Koks olejowy w swojej strukturze jest podobny do koksu petrochemicznego. Cząstki koksowe powstają w procesie pirolizy oleju: po odparowaniu lżejszych frakcji, ciężkie frakcje ulegają kondensacji w związki pierścieniowe, które tworzą asfalty, a następnie smołę i ostatecznie karbonizat [101]. Tendencja do tworzenia się koksu olejowego w trakcie spalania rozpylonego oleju wzrasta z zawartością węglowodorów aromatycznych w oleju [36]. W przypadku spalania mazutu rozmiary cząstek koksowych są zbliżone do wielkości kropeł oleju (50 \div 300 μm) i mają postać cenosfer. Mniejsze cząstki są odłamekami węglowych powłok powstających w wyniku spalania kropeł ciężkiego oleju [101]. Materiał cząstek koksowych jest twardszy od sadzy i trudno się utlenia [40]. Ocenia się, że spalanie cenosfery wymaga 20 \div 40 % całkowitego czasu spalania kropeł oleju [170].

Koksik węglowy powstaje podczas spalania węgla. Jego mała, ale znacząca dla środowiska naturalnego, ilość submikronowych cząstek węgla zwanych koksikiem węglowym, wydobywa się z kotła z lotnym popiołem. Mechanizmy powstawania tych drobnych cząstek węgla są bardzo złożone [7]. Pierwszy mechanizm zachodzi pod wpływem ciśnienia wewnętrznego podczas odgazowania cząstki węgla. Cząstka węgla ulega rozpadowi na mniejsze cząstki („fragmentacja”), które z kolei mogą uzyskiwać dużą prędkość obrotową nadaną im przez wydobywające się z nich części lotne. Siły odśrodkowe są na tyle duże, że wirujące cząstki rozpadają się. Drugi mechanizm polega na rozpadzie cząstek koksu w czasie powolnego utleniania, spowodowanego zwiększającą się ich porowatością podczas spalania, która osłabia ich wytrzymałość mechaniczną [7]. W kotłach z paleniskiem fluidalnym przebiegają również procesy ścierania i wywiewania (ang. elutriation) cząstek koksu [7]. Mniej reaktywne frakcje węgla mogą być wynoszone z kotła ze spalinami, dla wielkości niedopału istotna jest więc struktura petrograficzna spalanych węgli. Wraz z zastosowaniem niskoemisyjnych technik spalania rosną straty spalania LOI (z ang. Loss On Ignition). Zależnie od zastosowanej techniki należy liczyć się ze wzrostem udziału części palnych w popiele od 2 do 6 % [63].

Popiół jest odpadem paleniskowym. W kotłach pyłowych i rusztowych odpad paleniskowy przybiera postać lotnego popiołu oraz żużlu. Powstaje w wyniku przemian podczas spalania występującej w paliwach stałych substancji mineralnej. Substancja mineralna zawiera około 30 związków, z których większość występuje w ilościach śladowych. Jej zawartość w węglu określa się na od 10 do 60 % w ujęciu wagowym. Substancję mineralną dzieli się na związaną substancję mineralną oraz wolną substancję mineralną. Związana substancja mineralna pochodzi z substancji mineralnej roślinności wolotwórczej i trudno ją usunąć z węgla. Wolna substancja mineralna składa się z makroskopowo rozróżnialnej grupy minerałów pochodzenia zewnętrznego [24, 57]. Najważniejsze cztery grupy minerałów w węglu to:

- glino-krzemiany - głównym ich przedstawicielem jest kaolinit,
- tlenki, jak krzemionka SiO_2 i hematyt Fe_2O_3 ,
- węglany - kalcyt CaCO_3 , syderyt FeCO_3 i dolomit $\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$,
- związki siarki - piryt FeS_2 i gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Substancja mineralna zawarta w węglu w wyniku spalania oraz nagrzewania ulega przemianom fizycznym i chemicznym, dlatego jej skład różni się od składu popiołu. Przemiany chemiczne substancji mineralnej to dehydratacja, rozkład węglanów i siarczanów. Z kolei przemiany fizyczne substancji mineralnej to: zmiana struktury krystalicznej, parowanie, topnienie kondensacja oraz tworzenie cenosfer. W zależności od składu substancji mineralnej temperatura rozpoczęcia topnienia mieści się w zakresie $800 \div 1000$ °C. Na rysunku 1.18 przedstawiono mechanizmy powstawania cząstek lotnego popiołu podczas spalania węgla [8].



Rys. 1.18. Mechanizmy powstawania popiołu podczas spalania węgla [8]

Skład chemiczny popiołu zależy od substancji mineralnej, która ma swoją charakterystykę odpowiednią dla danego węgla i jego złoża. Skład substancji mineralnej konkretnych węgli jest stosunkowo rzadko określany. Znana jest jej ogólna charakterystyka w odróżnieniu do składu popiołu pochodzącego z różnych węgli, który zmienia się w stosunkowo szerokim zakresie. Granulacja popiołu oraz jego właściwości fizyczne, podobnie jak skład chemiczny, zależą od wyjściowej substancji mineralnej, sposobu jej spalania jak też rodzaju kotła. Pozostałością po spaleniu części palnych jest odpad paleniskowy w postaci żużla i lotnego popiołu. W kotłach pyłowych zawartość żużla w odpadzie paleniskowym wynosi $10 \div 15$ %, a lotnego popiołu $85 \div 90$ %. W $80 \div 90$ % uzyskany popiół lotny w wyniku spalania węgla kamiennego jest materiałem szklistym, charakteryzującym się niewielką rozpuszczalnością w wodzie. Popiół lotny uzyskany ze spalania węgla brunatnego zawiera mniej materiału szklistego ($50 \div 80$ %), a materiał ilasty ma większy udział. Skład granulometryczny popiołów lotnych charakteryzuje się udziałami frakcji piaskowej ($2 \div 0,05$ mm), pyłowej ($50 \div 2$ μ m) i iłowej ($2 \div 1$ μ m). W popiołach z kotłów pyłowych przeważającą część stanowią frakcje piaskowe i pyłowe. Natomiast popioły z węgla brunatnego posiadają większy udział frakcji drobnych (iłowej $2 \div 20$ % i pyłowej $70 \div 95$ %) niż popioły z węgla kamiennego (frakcja iłowa $2 \div 12$ %, frakcja pyłowa $60 \div 90$ %) [73]. Popioły z kotłów pyłowych charakteryzują się niską rozpuszczalnością, a ich odcieki wodne nie stanowią zagrożenia dla naturalnego środowiska. W przypadku kotłów fluidalnych z powodu niskiej temperatury spalania w zakresie $800 \div 900$ °C popioły nie są przetopione i cechują się większą porowatością. Ważny wpływ na właściwości chemiczne odpadów paleniskowych ma zastosowana metoda odsiarczania spalin. W wyniku suchej metody odsiarczania w popiele znajdują się siarczany, siarczyny oraz sorbenty CaO. Udział CaO w popiele daje mu silnie zasadowy charakter. Istnieje również niebezpieczeństwo wyplukania siarki do wód gruntowych. Z powodu udziału siarczanu i siarczynu wapnia oraz tlenku wapnia, popioły z kotłów z suchym odsiarczaniem są niestabilne i wymagają około rocznej stabilizacji (hydratacji) przed użytkowaniem lub składowaniem [3]. Sięgający 50 % udział produktów odsiarczania (CaO, CaCO₃, CaSO₄, CaSO₃) w popiele powoduje znaczne zmiany chemiczne i fazowe popiołu podczas jego składowania [31]. Głównym wyzwaniem związanym z konstrukcją kotłów jest wzrost zawartości części palnych w popiele przy stosowaniu technik niskoemisyjnego o obniżonej emisji NO_x [49, 59].

Tab. 1.22. Emisja metali ciężkich (Pb, Cu, Zn, As) w wybranych latach w tys. ton [69]

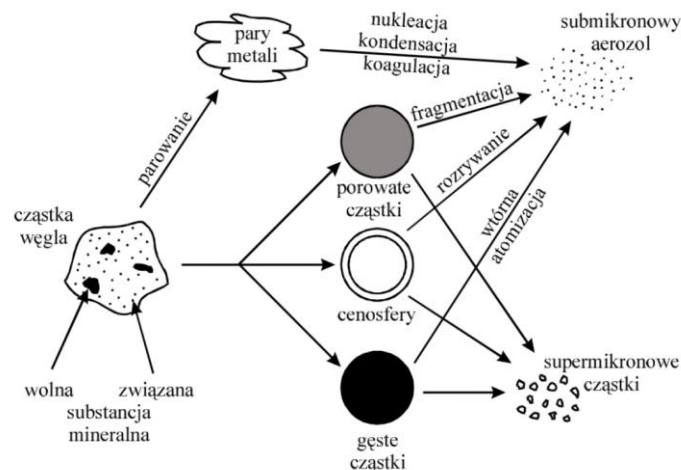
Źródło emisji wg kategorii NFR	Pb		Cu		Zn		As	
	1990	2020	1990	2020	1990	2020	1990	2020
Ogółem	539,72	247,08	171,90	186,90	781,08	454,52	144,18	14,30
1. Energia	350,19	98,39	146,10	132,55	679,24	373,03	19,90	8,56
A. Spalanie paliw	44,99	95,31	145,39	132,05	676,20	371,18	19,66	8,33
1. Przemysły energetyczne	06,15	25,22	65,91	18,06	412,58	99,49	13,97	4,77
2. Przemysł wytwór. i budownictwo	33,08	20,07	20,27	10,77	135,04	113,99	3,31	1,77
3. Transport	149,14	9,07	20,04	71,89	7,40	26,75	0,03	0,10
4. Inne sektory	56,61	40,95	39,16	31,33	121,17	130,96	2,35	1,69
B. Emisja lotna z paliw	5,20	3,09	0,71	0,50	3,04	1,84	0,24	0,23
1. Lotna emisja z paliw stałych	5,14	2,96	0,65	0,37	2,97	1,71	0,18	0,10
2. Lotna emisja z systemu gazu ziemnego i ropy naftowej	0,07	0,13	0,07	0,13	0,07	0,13	0,07	0,13
2. Procesy przemysłowe	188,17	148,13	25,54	54,22	97,16	75,10	124,17	5,57
A. Produkty mineralne	2,20	7,14	0,01	0,03	0,39	1,37	0,23	0,77
B. Przemysł chemiczny	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C. Produkcja metali	185,63	137,72	16,48	21,83	91,57	55,00	123,93	4,80
D. Stosowanie rozpuszczalników i innych produktów	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G. – L. Inne	0,35	3,28	9,05	32,36	5,20	18,73	0,00	0,01
3. Rolnictwo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
B. Nawozy naturalne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D. Gleby rolne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F. Spalanie resztek roślinnych	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
5. Odpady	1,36	0,55	0,26	0,12	4,66	6,38	0,12	0,16
A. Składowiska odpadów stałych	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C. Spopielenie i otwarte spalanie odpadów	1,36	0,55	0,26	0,12	4,66	6,38	0,12	0,16
D. Gospodarka ściekami	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E. Inne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Pierwiastki śladowe potocznie kojarzone są z metalami ciężkimi. Jednak metale ciężkie stawią tylko część pierwiastków śladowych zawartych w węglu [23]. Pierwiastki śladowe w otoczeniu występują w otoczeniu w bardzo małym stężeniu. W tabeli 1.22 przedstawiono dane o emisji metali ciężkich do powietrza w roku 1990 i 2020 z różnych źródeł według kategorii NFR w poszczególnych sektorach [69]. Zawartość pierwiastków śladowych w popiele powstałym po spalaniu węgla wzrasta o współczynnik $100/(\text{zawartość części mineralnych w węglu } \%)$, w związku z tym ich emisja jest proporcjonalna do ilości emitowanego popiołu [138]. Pierwiastki śladowe można podzielić na trzy grupy w zależności od ich stanu w spalinach, który odpowiada ich efektywności w elektrofiltrze (tab. 1.23) [138].

Tab. 1.23. Klasyfikacja pierwiastków śladowych [35]

Grupa	Postać	Pierwiastki	Efektywność w elektrofiltrze
I	stała	Al, Ca, Ce, Cs, Eu, Fe, Hf, K, La, Mg, Sc, Sm, Si, Sr, Th, Ti	są zatrzymywane w elektrofiltrze w stopniu proporcjonalnym do stopnia odpylania spalin
II	po: odparowaniu, kondensacji, absorpcji przez lotny popiół	As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Ga, Ge, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Rb, Sb, U, V, W, Tl, Zn	częściowo zaabsorbowane w elektrofiltrze: efektywność mieści się między wartościami grupą I i II
III	para	B, Br, C, Cl, F, Hg, I, Ni, Se	pozostają na wyjściu z elektrofiltru w postaci lotnej

W wyniku spalania pyłu węglowego większa ilość alkalicznych i ciężkich metali podlega odparowaniu. Jest to spowodowane niższą temperaturą na wylocie z kotła od temperatury punktu rosy metali, w związku z tym metale alkaliczne i ciężkie kondensują do drobnych, submikronowych cząstek (rys. 1.19). Skłonność do zarodkowania cząstek zależy od szybkości chłodzenia spalin. Poniżej 400 K/s kondensacja submikronowych cząstek popiołu może być w znaczącym stopniu zredukowana [133].



Rys. 1.19. Możliwe przekształcenia metali ciężkich podczas spalania węgla [64]

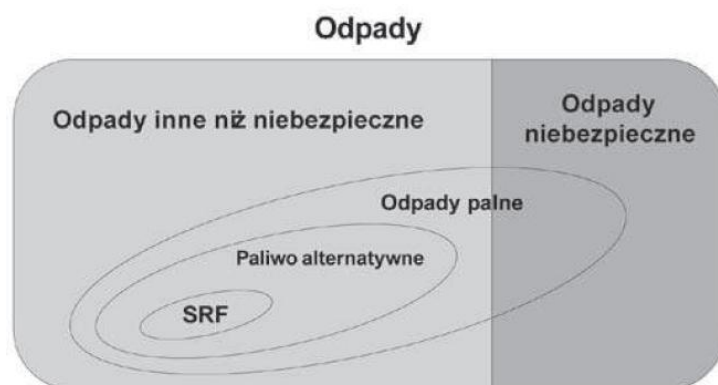
Zagrożenie dla zdrowia wynika z możliwości wzbogacenia submikronowych cząstek w powietrzu trującymi metalami ciężkimi. Częściowym rozwiązaniem problemu jest instalacja mokrego odsiarczania spalin, która wychwytuje znaczącą ich część ok. 60 ÷ 90 % [133]. Przykładowym przedstawicielem pierwiastków z grupy III jest rtęć. Rtęć zaliczana jest do substancji bardzo niebezpiecznych dla środowiska z powodu jej aktywności chemicznej i biologicznej. W Polsce w wyniku działalności człowieka emisja rtęci wynosi około 36 Mg/rok. Ze spalania węgla kamiennego ok. 13 Mg/rok, a ze spalania węgla brunatnego około 7 Mg/rok [88]. W instalacjach NO SCR (ang. Selective Catalytic Reduction) usuwane jest od 40 do 60 % Hg [15].

1.4. Aktualne standardy, normy i akty prawne w ochronie środowiska

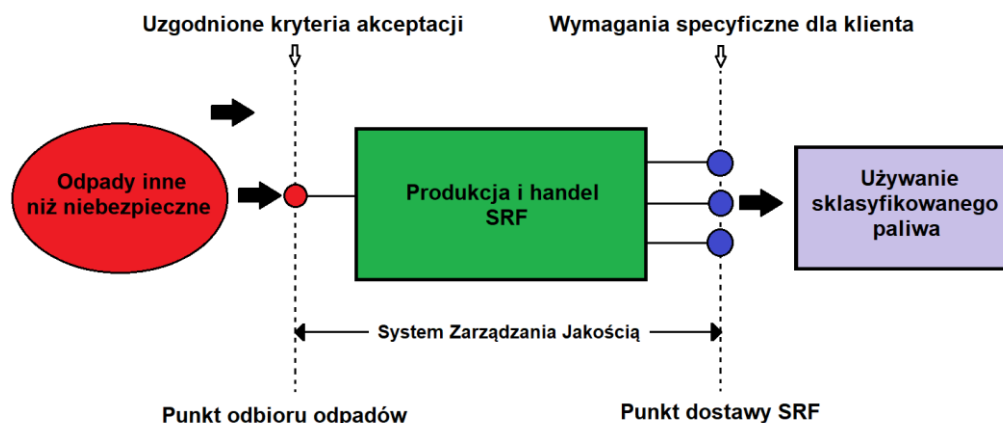
1.4.1. Paliwa z odpadów

Wykorzystywanie odpadów jako paliwa pełni istotną rolę w utylizacji odpadów. Do niedawna paliwa wytwarzane z odpadów na terenie Europy, w zależności od kraju, nosiły różne nazwy, co prowadziło do nieporozumień w kwestiach prawnych oraz handlowych. W Niemczech nazywane były SBS (niem. Sekundärbrennstoffe), EBS (niem. Ersatzbrennstoffe) lub BRAM (niem. Brennstoff aus Müll) [95]. We Włoszech nosiły nazwę CDR (wł. Combustibili Derivato di Rifiutti) lub CSS (wł. Combustibili Solido Secondario). W innych krajach europejskich z kolei nazywane były RDF (ang. Refused Derived Fuel – Paliwo z Odpadów) [127]. Również w Polsce ta kwestia nie była

uregulowana. Paliwa wytwarzane z odpadów funkcjonowały równolegle pod nazwami „paliwo alternatywne”, „paliwo zastępcze”, PAKOM (paliwo komunalne) lub „paliwo formowane” [163, 166]. W 2011 r. w Unii Europejskiej podjęto działania mające na celu ujednoczenie standardów dla paliw stałych produkowanych z odpadów. W wyniku tych działań Komitet Techniczny CEN/TC 343 opracował specyfikacje i raporty techniczne, na podstawie których wprowadzono szereg norm [105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116], z których część z nich została zaktualizowana w 2021 r. Przyjęto ujednoczoną nazwę odnawialne paliwa stałe SRF (ang. Solid Recover Fuels) [160, 165]. W języku polskim przyjęto przez Polski Komitet Normalizacyjny tłumaczenie SFR jako stałe paliwa wtórne [110, 111]. Zgodnie z definicją zawartą w normie [110], SRF to stałe paliwo wyprodukowane z odpadów innych, niż niebezpieczne, przetwarzane poprzez odzysk energii w odpowiedniej instalacji. Na rysunku 1.20 przedstawiono umiejscowienie SRF wśród innych odpadów [166], a na rysunku 1.21 został przedstawiony schemat zarządzania jakością SRF, zaczerpnięty z normy [105].



Rys. 1.20. Umiejscowienie SRF na mapie odpadów [166]

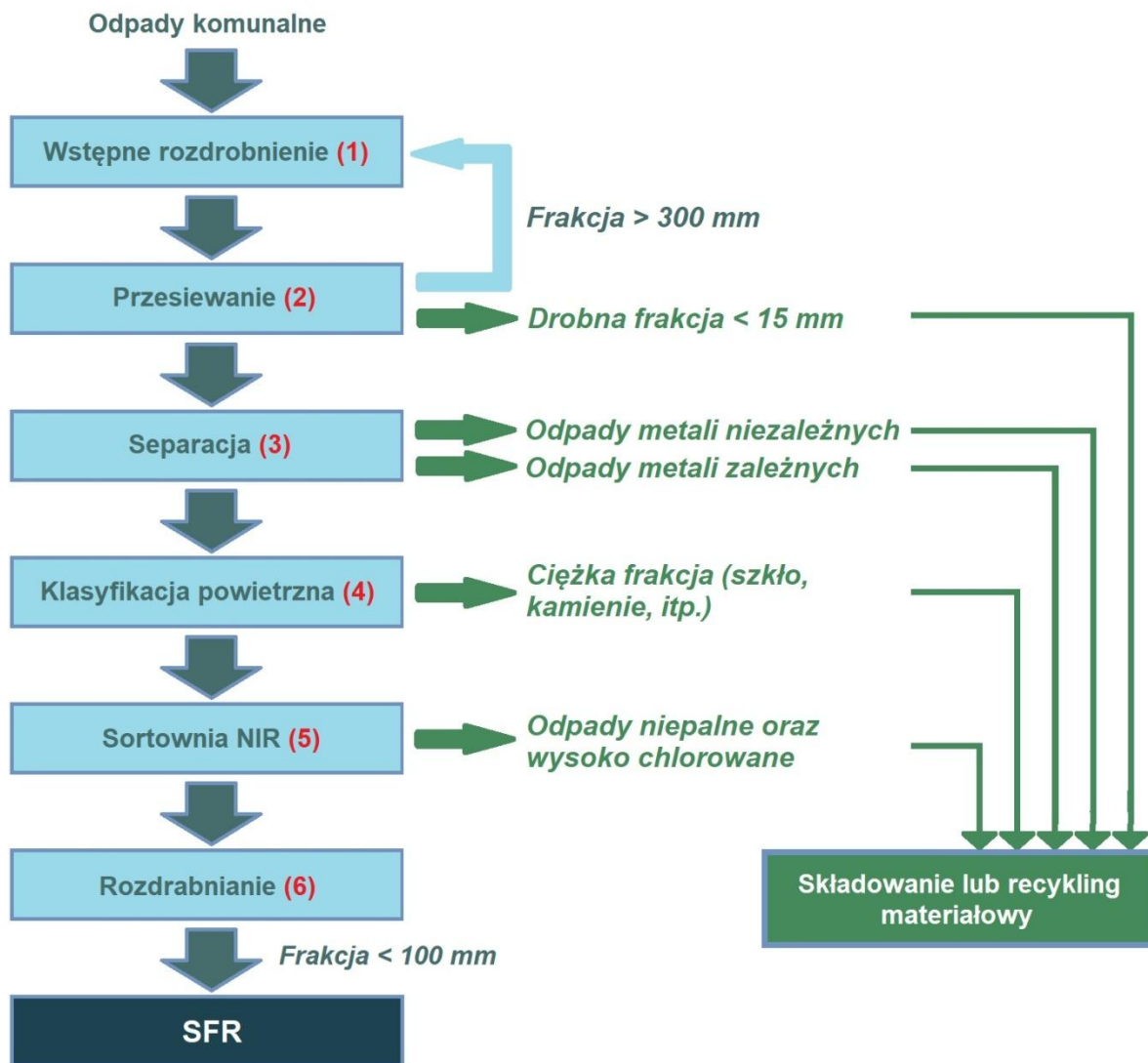


Rys. 1.21. System zarządzania jakością w produkcji i handlu stałymi paliwami wtórnymi [opracowanie własne]

Tab. 1.24. Wartości parametrów klasyfikacyjnych dla stałych paliw wtórnych wg CEN [111]

Parametr	Statystyka	Jednostka	Klasa				
			1	2	3	4	5
Wartość opałowa (NCV)	średnia	[MJ/kg] w st. robocz.	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Zawartość chloru (Cl)	średnia	[%] w st. suchym	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Zawartość rtęci (Hg)	mediana	[MJ/kg] w st. robocz.	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	80-ty percentyl	[MJ/kg] w st. robocz.	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

Zgodnie z tym z schematem w normie [111] został przedstawiony system klasyfikacji podający pięć klas SRF opierający się na parametrach klasyfikacyjnych takich jak wartość opałowa, zawartość chloru oraz rtęci przedstawionych w tabeli 1.24. Jest on oparty na trzech kluczowych parametrach: wartości opałowej, zawartości chloru i rtęci [106, 107, 113]. Wybór tych parametrów podyktowany był aspektami oceny wartości użytkowej paliwa: ekonomicznymi, technologicznymi oraz środowiskowymi (emisyjnymi). Nie są to jednak parametry w pełni określające właściwości paliwowe danego SRF. Aby zachować ekonomię procesu termicznego, należy poznać również zawartość popiołu [108], siarki [106, 114], węgla i wodoru [114]. Metody wytwarzania paliwa z odpadów komunalnych różnią się od siebie pod względem stopnia technicznego skomplikowania. Na rysunku 1.22 przedstawiony został przykładowy schemat operacji jednostkowych wykonywanych podczas przekształcania odpadów komunalnych do paliwa typu SRF [104].



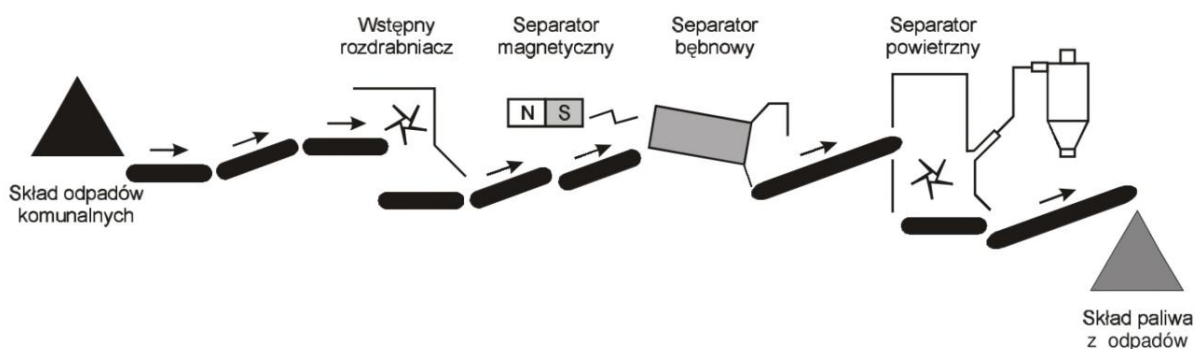
Rys. 1.22. Schemat przykładowych operacji jednostkowych wykonywanych podczas przekształcania odpadów komunalnych do paliwa typu SRF [104]

Proces konwersji odpadów do paliwa powinien charakteryzować się dużą efektywnością uzysku frakcji palnych, maksymalnym stopniem separacji odpadów niepalnych, bądź wysoko chlorowanych, w celu otrzymania paliwa o odpowiednich właściwościach jakościowych oraz walorach użytkowych.

Przekształcania odpadów komunalnych do paliwa typu SRF odbywa się w następujących etapach:

- etap nr 1: surowiec poddawany jest procesowi wstępnego rozdrobnienia do frakcji o średnim rozmiarze <math><300\text{ mm}</math>,
- etap nr 2: odpady przesiewa się w celu odseparowania nadziarna, które jest z powrotem zwracane do procesu wstępnego rozdrabniania surowca oraz drobnej frakcji (podziarna), która docelowo będzie kierowana na składowisko odpadów,
- etap nr 3: strumień odpadów o odpowiednim rozkładzie uziarnienia trafia do separatora magnetycznego oraz separatora prądów wirowych w celu oddzielenia odpadów żelaznych oraz nieżelaznych,
- etap 4: frakcja odpadów pozbawiona wtrąceń żelaznych oraz nieżelaznych kierowana jest do separatora powietrznego w celu rozdziału odpadów lekkich (typu papier i tektura, tworzywa sztuczne, tkaniny, pianki, drewno itp.) od ciężkich,
- etap 5: lekka frakcja odpadów kierowana jest do sortowni wyposażonej np. w czujniki bliskiej podczerwieni NIR (ang. Near Infrared) w celu separacji frakcji niepalnych oraz wysoko chlorowanych (typu PCV),
- etap 6: ponowne rozdrabnianie odpadów w celu uzyskania frakcji o średnim uziarnieniu 80-100 mm, a następnie paliwo typu SRF jest wysyłane w postaci sypkiej, bądź w foliowanych belach, zależnie od preferencji odbiorcy.

Na rysunku 1.23 przedstawiony został schemat przykładowej instalacji do przetwarzania odpadów komunalnych w paliwo [65]. Wielkość udziału poszczególnych frakcji zależy od składu i źródła pochodzenia komunalnych odpadów oraz efektywności wykorzystanej w poszczególnych etapach technologii. W tabeli 1.25 przedstawiono przykładowy bilans masowy technologii wytwarzania paliwa typu SRF z odpadów komunalnych z uwzględnieniem poszczególnych frakcji odpadów uzyskanych w kolejnych procesach jednostkowych [15].



Rys. 1.23. Schemat instalacji do przetwarzania odpadów komunalnych w paliwo [65]

Tab. 1.25. Bilans masowy technologii wytwarzania paliwa typu SRF z odpadów komunalnych z podziałem na strumienie procesowe [51]

Stałe paliwa wtórne, SRF	Pozostałe				
	Ciężka frakcja	Drobna frakcja	Odpady niepalne i wysoko chlorowane	Metale nieżelazne	Metale żelazne
72 %	2 %	12 %	11 %	0,4 %	2,6 %

Odseparowane odpady poddawane są procesowi unieszkodliwiania (składowania) lub recyklingu (ukierunkowanym na odzysk materiałowy). Uzyskany strumień SRF stanowi potencjalne paliwo, które musi zostać odpowiednio przygotowane w zależności od wymogów technologii energetycznego odzysku energii. Właściwości paliw typu SRF zależą głównie od rodzaju odpadów, z jakich zostały wytworzone [104]. W celu stabilizacji i zmniejszenia zagrożeń biologicznych, do paliw z odpadów dodaje się wapno, a poprawę właściwości energetycznych uzyskuje się przez dodanie węgla. W tabeli 1.26 przedstawione zostało zestawienie właściwości fizycznych i chemicznych paliw typu SRF dostępnych w literaturze [69, 94, 176].

Tab. 1.26. Uśrednione właściwości paliw typu SRF [69, 94, 176]

Parametr	Jednostka	Paliwo SRF
Wartość opałowa	[MJ/kg]	9,15 – 35,16
Zawartość wilgoci całkowitej	[%]	1,7 – 30,45
Zawartość popiołu	[%]	3,98 – 24,3
Zawartość chloru	[%]	0,23 – 1,43
Zawartość rtęci	[mg/kg]	0,03 – 0,45
Zawartość siarki	[%]	0,10 – 0,95

W tabeli 1.27 przedstawione zostało porównanie właściwości węgla kamiennego z właściwościami nieprzetworzonych odpadów oraz stałego paliwa wtórnego [145].

Tab. 1.27. Porównanie niektórych właściwości stałego paliwa wtórnego oraz węgla [145]

Parametr	Węgiel kamienny	Nieprzetworzone odpady	Stale paliwo wtórne
Wykorzystana część odpadu [% wag.]	0	100	67
Wykorzystana energia z odpadu [%]	0	100	78
Składniki [% wag.]			
C	63,8	27,5	32,2
H	4,0	3,7	4,3
O	9,6	20,6	25,3
N	1,0	0,45	0,37
S	0,4	0,83	0,79
Cl		0,50	0,58
Wilgoć [%]	14,1	23,2	21,2
Popiół [%]	7,0	23,4	15,9
Ciepło spalania [MJ/kg]	25,9	11,2	13,2

1.4.2. Spalanie odpadów w gospodarstwach domowych

Spalanie odpadów w gospodarstwach domowych jest ważnym tematem z punktu widzenia ochrony środowiska i zdrowia publicznego. W celu zapewnienia bezpiecznego i efektywnego spalania odpadów, konieczne jest stosowanie się do określonych przepisów prawnych. Akty prawne regulujące spalanie odpadów w gospodarstwach domowych ustanawiają wymagania dotyczące bezpieczeństwa i jakości powietrza, a także zasady i odpowiedzialność za zarządzanie tymi odpadami. W Polsce spalanie odpadów w gospodarstwach domowych jest regulowane głównie w dwóch aktach prawnych:

- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach (Dz. U. z 2021 r. poz. 1149) [155]
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska (Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 627) [159]

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach reguluje kwestie związane z gospodarowaniem odpadami w Polsce, w tym spalanie odpadów w gospodarstwach domowych. Zgodnie z ustawą, spalanie odpadów w gospodarstwach domowych jest dozwolone tylko w przypadku braku możliwości ich przekazania do odpowiedniej jednostki, pod warunkiem spełnienia określonych warunków technicznych i ekologicznych. Właściciele nieruchomości są odpowiedzialni za gromadzenie, magazynowanie i przekazywanie odpadów do odpowiednich jednostek, a także za spełnienie wymagań dotyczących spalania odpadów. Warto zaznaczyć, że udzielenie zezwolenia na spalanie odpadów w gospodarstwach domowych jest uzależnione od spełnienia szeregu wymagań określonych w ustawie o odpadach. W przypadku ich niespełnienia zgodnie z ustawą o odpadach i kodeksem wykroczeń, zakazane jest spalanie odpadów w piecach, kotłowniach domowych, jak również na wolnym powietrzu. Art. 26 ust. 1 ustawy reguluje kwestię zarządzania odpadami w Polsce. Zgodnie z tym artykułem, właściciele nieruchomości są odpowiedzialni za gromadzenie, magazynowanie i przekazywanie odpadów do odpowiednich jednostek. Artykuł ten określa również zasady udzielania zezwoleń na spalanie odpadów w gospodarstwach domowych, w tym warunki techniczne i ekologiczne, jakie muszą być spełnione. Zgodnie z art. 30 ust. 1 zakazuje się przetwarzania odpadów

(w tym w sposób termiczny) poza instalacjami i urządzeniami. Z kolei art. 31 ust. 7 tej ustawy przewiduje, że dopuszcza się spalanie zgromadzonych pozostałości roślinnych poza instalacjami i urządzeniami, lecz jedynie wówczas, gdy nie są objęte obowiązkiem selektywnego zbierania. Art. 155 mówi o tym, że termiczne przekształcanie odpadów może być prowadzone tylko w specjalnych instalacjach, zwanych spalarniami lub współspalarniami odpadów, z pewnymi wyjątkami opisanymi w artykule 31. Z kolei artykuł 191 karze aresztem lub grzywną osobę, która termicznie przekształca odpady poza tymi specjalnymi instalacjami, niezgodnie z zakazem zawartym w artykule 155.

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska ma na celu określenie zasad dotyczących ochrony środowiska i warunków korzystania z jego zasobów, biorąc pod uwagę potrzeby zrównoważonego rozwoju. W szczególności, ustawa reguluje:

- określenie warunków ochrony zasobów środowiska, wprowadzania substancji i energii do środowiska oraz kosztów korzystania ze środowiska,
- udostępnianie informacji na temat środowiska i jego ochrony,
- zaangażowanie społeczeństwa w proces ochrony środowiska,
- obowiązki organów administracji,
- odpowiedzialność i konsekwencje prawne za nieprzestrzeganie przepisów.

Między innymi w ustawie zawarte są przepisy prawne upoważniające odpowiednie organy do przeprowadzenia kontroli na terenie gospodarstw domowych w przypadku podejrzenia spalania odpadów niezgodnego z prawem. Zgodnie z art. 363 wójt, burmistrz lub prezydent miasta może w drodze decyzji nakazać osobie fizycznej, której działalność negatywnie oddziałuje na środowisko, wykonanie w określonym czasie czynności zmierzających do ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko. Art. 379 ustawy reguluje kontrolę przestrzegania i stosowania przepisów o ochronie środowiska przez marszałka województwa, starostę, wójta, burmistrza lub prezydenta miasta. Władze te mogą przekazać wykonywanie funkcji kontrolnych pracownikom urzędów, którzy podlegają bezpośrednio pod nie, takim jak urzędy marszałkowskie, powiatowe, miejskie i gminne, jak również funkcjonariuszom straży gminnej. Osoba kontrolująca, podczas wykonywania kontroli, posiada prawo do:

- wstępu wraz z ekspertami i niezbędnym wyposażeniem na teren nieruchomości, budynku lub ich części, gdzie prowadzona jest działalność gospodarcza, przez całą dobę, a w godzinach od 6 do 22 na pozostały teren;
- przeprowadzania badań lub wykonywania innych potrzebnych czynności kontrolnych;
- zgłaszania żądań informacji pisemnych lub ustnych, jak również wezwania i przesłuchania osób w zakresie koniecznym do ustalenia stanu faktycznego;
- zgłaszania żądania udostępnienia dokumentów i danych związanych z tematyką kontroli.

Wójt, burmistrz lub prezydent miasta, starosta, marszałek województwa lub osoby przez nich upoważnione posiadają uprawnienie do występowania jako oskarżyciele publiczni w przypadku naruszenia przepisów dotyczących ochrony środowiska. Wójt, burmistrz, prezydent miasta, starosta i marszałek województwa mogą zwrócić się do wojewódzkiego inspektora ochrony środowiska o podjęcie działań w jego kompetencji, jeśli w wyniku kontroli stwierdzą one naruszenie przepisów ochrony środowiska lub mają uzasadnione podejrzenie takiego naruszenia, przesyłając dokumentację związaną z tą sprawą. Kierownik i kontrolowana osoba fizyczna są zobowiązani umożliwić przeprowadzenie kontroli, w tym dokonanie czynności określonych w ust. 3. Z kolei art. 380 reguluje kwestię protokołu z czynności kontrolnych. W trakcie kontroli kontrolujący jest zobowiązany do sporządzenia protokołu, którego jedna kopia jest dostarczana kierownikowi kontrolowanego podmiotu lub kontrolowanej osobie fizycznej. Protokół może zawierać zastrzeżenia, uwagi wraz z uzasadnieniem oraz powinien być podpisany przez obydwie strony. W przypadku odmowy podpisania protokołu przez osobę kontrolowaną, kontrolujący umieszcza o tym wzmiankę w protokole, a odmawiający może w terminie 7 dni zgłosić swoje stanowisko na piśmie do właściwego urzędu.

1.4.3. Uchwały antysmogowe

Uchwały potocznie zwane antysmogowymi to uchwały sejmików wojewódzkich, opracowywane przez urzędy marszałkowskie, w celu poprawy jakości powietrza na terenie wybranych miast lub całych województw. Prawo do wprowadzania uchwał antysmogowych przyznaje samorządom województw Ustawa Prawo o ochronie środowiska znowelizowana w tym celu w 2015 roku [159]. W Polsce od 2017 r. przyjęto tzw. uchwały antysmogowe na terenie czternastu województw. Wymagają one, w różnych okresach, wymiany starych urządzeń grzewczych, takich jak kotły, piece i kominki na bardziej nowoczesne modele, spełniające określone normy, a czasami nakładają pełne lub częściowe zakazy spalania węgla i/lub drewna [123]. W województwie wielkopolskim przyjęto trzy uchwały antysmogowe dotyczące: obszaru miasta Poznań [149], obszaru miasta Kalisz [150] oraz obszaru województwa wielkopolskiego z wyłączeniem Poznania i Kalisza [148].

Uchwała Sejmiku Województwa Wielkopolskiego z dnia 18 grudnia 2017 r. dotycząca obszaru miasta Poznań obowiązuje na obszarze miasta Poznań uchwałą tzw. antysmogową jest uchwała nr XXXIX/942/17 Sejmiku Województwa Wielkopolskiego z dnia 18 grudnia 2017 r. Według uchwały na terenie miasta Poznań instalowane mogą być kotły opalane węglem i drewnem spełniające według Ekoprojektu dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 lipca 2005 r. [33]. Kotły muszą mieć automatyczne podawanie paliwa lub być kotłami zgazowującymi, bez możliwości montażu rusztu awaryjnego. Piece i kominki muszą spełniać wymogi dotyczące emisji i efektywności zgodnie ze wspomnianym Ekoprojektem. Urządzenia, które nie spełniają tych wymagań, muszą osiągnąć co najmniej 80 % efektywności albo być wyposażone w system oczyszczania spalin. Dodatkowo uchwała wymusza wymianę kotłów i pieców w Poznaniu w terminach:

- do 1 stycznia 2024: wymienione muszą być kotły niespełniające wymogów emisyjnych i sprawności żadnej z klas normy PN-EN 303-5:2012 [109],
- do 1 stycznia 2026: wymienione muszą być piece i kominki niespełniające docelowych wymogów uchwały, po tym terminie albo należy je wymienić, albo doposażyć w instalację filtrującą spaliny do poziomu wymaganego przez ekoprojekt, chyba że urządzenie osiąga sprawność min. 80 %,
- od 1 stycznia 2028: nie będzie już można użytkować kotłów i pieców spełniających wymogi emisyjne klas 3. i 4. normy PN-EN 303-5:2012 [109],
- kotły klasy 5. są uznawane za równoważne kotłom z Ecodesign i mogą być eksploatowane do końca ich żywotności.

Według uchwały od 1 maja 2018 nie można spalać w Poznaniu:

- mułu i flotokoncentratu oraz ich mieszanek,
- węgla brunatnego oraz jego mieszanek,
- węgla kamiennego, w którym frakcji o uziarnieniu poniżej 3mm jest więcej niż 15 % masowo,
- węgla kamiennego o wartości opałowej poniżej 23MJ/kg, zawartości popiołu wyższej niż 10 % lub zawartości siarki wyższej niż 0,8 %,
- drewna (biomasy) o wilgotności powyżej 20 %.

1.4.4 Emisja i sprawność kotłów małej mocy opalanych paliwami stałymi

Aktem prawnym obowiązującym na terenie Unii Europejskiej, regulującym wymagania dotyczące sprawności oraz emisji zanieczyszczeń przez kotły małej mocy na paliwo stałe, jest rozporządzenie Komisji UE 2015/1189 z dnia 28.04.2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących Ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe [33, 128, 130]. Dodatkowo inne akty prawne obowiązujące w Polsce, takie jak np. uchwały antysmogowe, odnoszą się do przepisów zawartych w normie PN-EN 303-5:2012 dotyczącej kotłów grzewczych [109].

Rozporządzenie Komisji UE 2015/1189 z dnia 28.04.2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących Ekoprojektu dla produktów związanych z produkcją energii (tzw. Ecodesign), reguluje wymagania dotyczące zużycia energii i emisji zanieczyszczeń przez kotły na paliwa stałe. Dokument ustanawia wymagania dotyczące obrotu i użytkowania kotłów na paliwo stałe o znamionowej mocy cieplnej poniżej 500 kW. Zgodnie z rozporządzeniem, od 1 stycznia 2020 kotły opalane paliwem stałym muszą spełniać określone kryteria, które są następujące:

- sezonowa efektywność energetyczna ogrzewania pomieszczeń dla kotłów o nominalnej mocy cieplnej 20 kW lub mniejszej nie może być mniejsza, niż 75 %,
- sezonowa efektywność energetyczna ogrzewania pomieszczeń dla kotłów o znamionowej mocy cieplnej przekraczającej 20 kW nie może być mniejsza, niż 77 %,
- emisje cząstek stałych, dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń, nie mogą przekraczać 40 mg/m³ w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa oraz 60 mg/m³ w przypadku kotłów z ręcznym podawaniem paliwa,
- emisje organicznych związków gazowych, dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń, nie mogą przekraczać 20 mg/m³ w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa oraz 30 mg/m³ w przypadku kotłów z ręcznym podawaniem paliwa,
- emisje tlenku węgla, dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń, nie mogą przekraczać 500 mg/m³ w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa oraz 700 mg/m³ w przypadku kotłów z ręcznym podawaniem paliwa,
- emisje tlenków azotu, wyrażone jako ekwiwalent dwutlenku azotu, dotyczące sezonowego ogrzewania pomieszczeń, nie mogą przekraczać 200 mg/m³ w przypadku kotłów na biomasę oraz 350 mg/m³ w przypadku kotłów na paliwa kopalne.

W przypadku kotła na paliwo stałe wymogi te muszą zostać spełnione dla paliwa zalecanego i dowolnego innego odpowiedniego paliwa [130]. W tabeli 1.28 podano graniczne wartości emisji zanieczyszczeń, według podziału na sposób zasilania paliwem, jego rodzaj oraz nominalną moc cieplną kotła zgodnie z postanowieniami rozporządzenia Komisji UE 2015/1189.

Tab. 1.28. Graniczne wartości emisji zanieczyszczeń według rozporządzenia 2015/1189 [130]

Sposób zasilania paliwem	Rodzaj paliwa	Nominalna moc cieplna [kW]	Graniczne wartości emisji zanieczyszczeń (emisja sezonowa), [mg/m ³ przy 10 % O ₂]			
			CO	OGC	pył	NOx
ręczny	biogeniczne	≤500	700	30	60	200
	kopalne					350
automatyczny	biogeniczne	≤500	500	20	40	200
	kopalne					350

Norma PN-EN 303-5:2012 „Kotły grzewcze. Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW. Terminologia, wymagania i oznakowanie” jest najważniejszym dokumentem normatywnym, określającym standardy dla kotłów na paliwa stałe o mocy cieplnej nieprzekraczającej 500 kW z załadunkiem ręcznym lub automatycznym paliwa. Norma dzieli kotły na trzy klasy, nadając im numery kolejno: 3, 4 i 5. Kryteriami podziału kotłów na klasy są graniczne wartości emisji zanieczyszczeń CO, OGC oraz pyłu. W tabeli 1.29 przedstawiono zestawienie standardów emisyjnych dla kotłów z ręcznym oraz automatycznym podawaniem paliwa dla poszczególnych klas, uwzględniając rodzaj paliwa oraz nominalną moc cieplną kotła [109].

W klasie 5 nastąpiło duże zaostrenie wymogów dotyczących emisji tlenku węgla. Poziom ograniczenia stężenia tlenku węgla wzrósł z 3000 mg/m³ w klasie 3 do 500 mg/m³ w klasie 5, co oznacza sześciokrotne zwiększenie. Podobnie jest w przypadku pyłów, gdzie wymagany jest trzykrotny spadek ich emisji do wartości 40 mg/m³. Zauważalne jest, że w klasach 4 i 5 kotłów nie ma już podziału na różne przedziały mocy, co wymaga zachowania takich samych parametrów emisyjnych dla całego typoszerokiego kotłów o mocy cieplnej do 500 kW [154]. Kolejnym kryterium według normy PN-EN 303-5:2012 jest wymagana minimalna sprawność cieplna kotłów. Sprawność cieplna kotła nie powinna być mniejsza od sprawności obliczonej na podstawie wzorów dotyczących odpowiednich klas:

Klasa 3 $\eta_k = 67 + 6 \log Q_N$

Klasa 4 $\eta_k = 80 + 2 \log Q_N$

Klasa 5 $\eta_k = 87 + \log Q_N$

gdzie: η_k jest to sprawność kotła [%], a Q_N jest nominalną mocą kotła [kW].

Zgodnie z aktualną normą, ważnym aspektem jest utrzymanie odpowiednich parametrów emisyjno-energetycznych kotła, kiedy jego moc odpowiada 30 % mocy nominalnej w celu zapewnienia prawidłowej pracy kotła, również w okresach przejściowych, w których nie ma dużego zapotrzebowania na ciepło [151, 152].

Tab. 1.29. Graniczne wartości emisji zanieczyszczeń [109]

Sposób zasilania paliwem	Rodzaj paliwa	Nominalna moc cieplna, kW	Graniczne wartości emisji zanieczyszczeń, [mg/m ³ przy 10 % O ₂ , odniesione do spalin suchych, 0°C, 1013 hPa]								
			CO wg. klas			OGC wg. klas			pył wg. klas		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
Ręczny	Biogeniczne	≤ 50	5000	1200	700	150	50	30	150	75	60
		(50, 150)	2500			100			150		
		(150, 500)	1200			100			150		
	Kopalne	≤ 50	5000	150	125						
		(50, 150)	2500	100	125						
		(150, 500)	1200	100	125						
Automatyczny	Biogeniczne	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40
		(50, 150)	2500			80			150		
		(150, 500)	1200			80			150		
	Kopalne	≤ 50	3000	100	125						
		(50, 150)	2500	80	125						
		(150, 500)	1200	80	125						

2. Stan wiedzy

Aktualny stan wiedzy na temat spalania odpadów komunalnych MSW (ang. Municipal Solid Waste) przedstawiony jest w licznych publikacjach w czasopismach naukowych, opisujących zagadnienia dotyczące przetwarzania odpadów komunalnych na energię WTE (ang. Waste to Energy). Publikacje te można podzielić na cztery grupy.

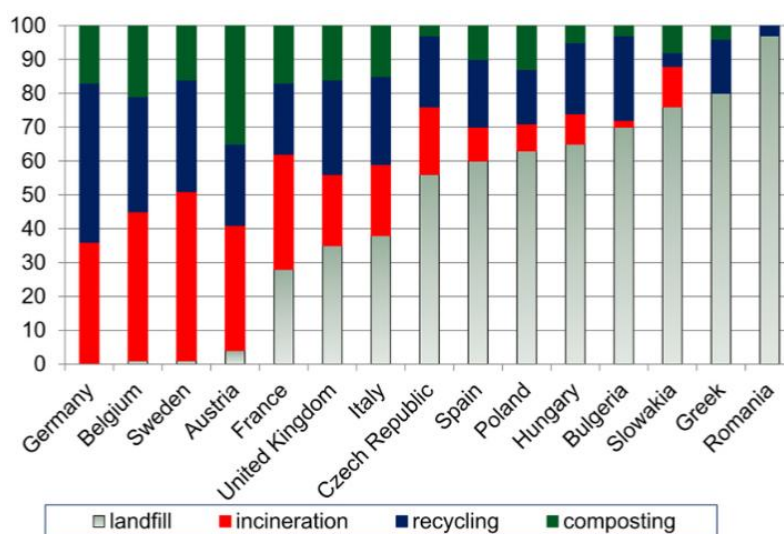
W pierwszej grupie artykułów skupiono się na problemie przetwarzania odpadów komunalnych na energię w zależności od regionu świata. W pracach [37, 76, 135] temat ten został przedstawiony w ujęciu globalnym. W artykule [76] zauważono, że przetwarzanie odpadów na energię WTE jest obiecującą alternatywą energetyczną dla przyszłych społeczeństw, ponieważ przewidywane 2,0 miliardy ton MSW odpowiada 2,247 bilionom kJ energii. Badania przedstawione w artykule wykazały, że palna frakcja dziennych 1155 ton MSW może wygenerować około 27,18 MW energii, co wystarczy do zasilenia prawie pięćdziesiąt tysięcy domów miesięcznie przy średnim zużyciu 500 W. Na całym świecie wytwarzanie stałych odpadów komunalnych rośnie z czasem z powodu szybkiej urbanizacji, wzrostu liczby ludności i globalizacji. Szacuje się, że wynosi ona około 2 miliardów ton rocznie, a do 2030 roku osiągnie 2,59 miliarda ton. Kilka czynników, takich jak wyrzucanie odpadów na powierzchnię ziemi, otwarte spalanie i nieformalne działania w sektorze recyklingu, są głównymi czynnikami odpowiedzialnymi za te statystyki dotyczące odpadów. Procesy te są trudne w obsłudze i około 93 % odpadów jest wyrzucanych lub spalanych w sposób otwarty, zwłaszcza w krajach rozwijających się, podczas gdy tylko 3 % tych odpadów jest składowanych. Kwestie związane z gospodarką odpadami stałymi SWM (ang. Solid Waste Management) w różnych krajach rosną wraz ze wzrostem ich dochodów, ekspansją populacji i urbanizacją, co utrudnia proces zarządzania odpadami. W pracy [135] dokonano przeglądu najnowszych osiągnięć w dziedzinie technologii „jednoczesnej redukcji odpadów i produkcji energii” opartej na zasadzie 5R (ang. Reduce, Reuse, Recycle, Recovery, and Restore). Rosnące wytwarzanie odpadów, zanieczyszczenie środowiska i wzrost zapotrzebowania na energię są głównymi problemami globalnymi. Aby poradzić sobie z tymi przeszkodami, wykorzystanie materiałów odpadowych do produkcji bioenergii lub wartościowych produktów jest potrzebą współczesnej ery. Powiązanie odpadów z energią oparte na zasadzie 5R jest podstawą zrównoważonego rozwoju. Schemat pokazuje poglądowo rysunek 2.1. Pomaga to w przejściu od systemu liniowego, który opiera się na podejściu "make-use-throw" do znacznie bardziej rozsądnego systemu cyrkularnego opartego na podejściu "make-use-recycle-reuse". Niniejszy przegląd przedstawia aktualny stan badań nad technikami "jednoczesnej redukcji odpadów i produkcji energii". Odpady, w tym odpady komunalne, odpady organiczne, pozostałości rolnicze i ścieki przemysłowe można przetwarzać kilkoma metodami. Szczegółowo przeanalizowano metody termiczne (piroliza, spalanie i zgazowanie), biochemiczne (fermentacja beztlenowa, kompostowanie tlenowe, produkcja bioetanolu i fermentacyjna produkcja biowodoru) wraz z technologiami obróbki wstępnej.



Rys. 2.1. Uogólniony diagram zarządzania odpadami 5R [135]

W artykule [37] dokonano przeglądu aktualnego stanu procesu oraz wyzwań legislacyjnych związanych z zastosowaniem paliw alternatywnych. Zasadniczym powodem sporządzenia niniejszej

oceny wiedzy są ograniczone możliwości wykorzystania odpadów jako paliwa, takiego jak RDF, w komercyjnej energetyce ze względu na ograniczenia procesu spalania. Zgodnie z wynikami analiz przedstawionych w publikacji tylko około 48 % paliw RDF może być wykorzystanych do bezpiecznego wytwarzania energii. Aby w pełni zrealizować obietnicę paliw RDF, pozostałe 52 % wymaga innego podejścia technologicznego, procesowego lub termicznego. W artykułach [84, 93 124, 142] podjęto temat gospodarowania odpadami komunalnymi na terenie Unii Europejskiej. W pracy [84] przedstawiono całościowy przegląd krajowych systemów gospodarowania odpadami komunalnymi i przetwarzania odpadów na energię jako ich ważnej części w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym w wybranych krajach Europy. Z kolei w publikacji [124] zaproponowano nowy model metodologii charakteryzacji resztkowych odpadów komunalnych RMSW (ang. Residual Municipal Solid Waste), odpowiedni do planowania gospodarki odpadami w ramach zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. W artykule [142] na podstawie 19 spalarni odpadów przemysłowych o szerokim zakresie mocy technologicznych od 15 kt/r do 0,3 kt/r oraz trzech spalarni odpadów komunalnych o wydajności nominalnej 300, 250 i 9 kt/r znajdujących się na terenie Republiki Czeskiej przeanalizowano zagadnienia związane z WTE, technologiami termicznego przekształcania odpadów, systemami odzysku ciepła, problematyką spalin oraz środkami oczyszczania spalin. Przedstawiono oraz porównano najnowocześniejszy sprzęt stosowany w technologiach WTE. Omówiono również dostępne oprogramowanie do symulacji procesów WTE. W publikacji [93] przedstawiono zastosowanie nowych technologii utylizacji i zwiększenie możliwości recyklingu mających na celu przekształcenie gospodarki odpadami w gospodarkę zasobami na terenie Niemiec w wyniku wprowadzenia ustawy o zarządzaniu obiegiem zamkniętym. Na rysunku 2.2 pokazano udział gałęzi przemysłu biorących udział w procesie przetwarzania odpadów komunalnych w wybranych krajach UE.

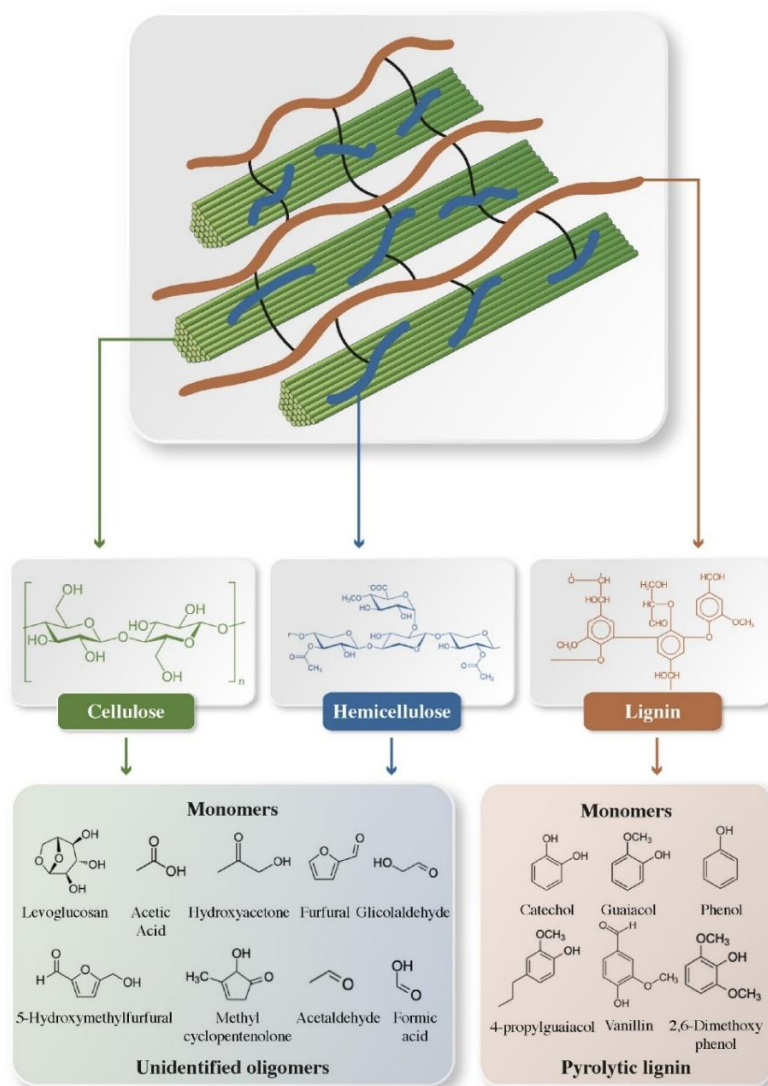


Rys. 2.2. Przetwarzanie stałych odpadów komunalnych w wybranych krajach UE [%] (EuroStat 2015) [93]

Możliwość wytwarzania energii ze spalania MSW w społecznościach wyspiarskich w związku z problem braku zarówno pierwotnych źródeł energii, jak i wody pitnej omówiono w [136]. Rozwiązanie oparto na termodynamice, analizach środowiskowych i ekonomicznych oraz modelowaniu 3D-GIS dla wyżej wymienionych problemów dla Republiki Zielonego Przylądka. Model ten integruje optymalizację transportu odpadów i spalanie z odzyskiem energii, łącząc produkcję ciepła i energii elektrycznej, ciepło wykorzystywane do produkcji wody pitnej. Przeprowadzona ocena środowiskowa i ekonomiczna wskazuje na wykonalność proponowanego rozwiązania CHP (ang. Combined Heat and Power) w zakresie wykorzystania odpadów do produkcji wody pitnej przy użyciu turbin parowych, które przynosi znaczną redukcję emisji netto do powietrza (1600 ton), w tym znaczny spadek emisji gazów cieplarnianych (131 000 ton CO₂), a przychody ze sprzedaży energii (15 mln Euro) mogą potencjalnie zrównoważyć koszty spalania.

W publikacjach [25, 177] przedstawiono problem emisji dioksyn w wyniku spalania stałych odpadów komunalnych w Chinach. W artykule [25] zauważono, że spalanie MSW w Chinach charakteryzuje się

znacznie wyższymi wskaźnikami emisji dioksan, niż w krajach rozwiniętych, co częściowo wynika z luk w technologiach spalania i oczyszczania spalin. Ponadto obecna polityka i praktyki zarządzania również znacząco przyczyniają się do problemu. w artykule [177] Badanie charakterystyki emisji dioksyn w okresie eksploatacji pełnej konserwacji spalarni odpadów komunalnych w Pekinie. Rysunek 2.3 obrazuje złożoność reakcji oraz ilość produktów, które mogą powstawać w wyniku spalania biomasy roślinnej. W pracy [6] przedstawiono możliwe do zrealizowania metody przetwarzania odpadów tworzyw sztucznych na podstawie profili odpadów tworzyw sztucznych w wybranych regionach Afryki. Porównano opcje przetwarzania jednorazowych, wielowarstwowych i kompozytowych odpadów z tworzyw sztucznych takie jak spalanie, konwencjonalną pirolizę, konwencjonalne zgazowanie i zgazowanie katalityczne. Wybrane technologie zostały ocenione z naciskiem na określone wskaźniki wydajności takie jak np. wartość opałowa LHV (ang. Low Heating Value). Pod uwagę brane były wskaźniki, które muszą charakteryzować się wysoką dojrzałością techniczną. Powyższe procesy mają poziom gotowości technologicznej TRL (ang. Technology Readiness Level) co najmniej 6, co oznacza, że są gotowe do wdrożenia w celu demonstracji i testów. Podobny temat poruszyli naukowcy z Kanady w pracy [53], w której opracowali system przetwarzania odpadów sztucznych w energię do produkcji wodoru, energii elektrycznej, ciepła, ciepłej wody użytkowej i wody słodkiej. Proponowany system wykorzystuje gazyfikację odpadów z tworzyw sztucznych do produkcji gazu syntezowego, który jest przetwarzany przez wiele podsystemów. w zaprojektowanej instalacji wykorzystana została energia geotermalna do produkcji pary potrzebnej do zgazowania odpadów z tworzyw sztucznych.



Rys. 2.3. Typowe składniki biomasy pochodzenia roślinnego oraz produkty powstające z pirolizy biomasy lignocelulozowej [177]

Inną koncepcję analizy wykorzystania odpadów prezentują prace, w których przedstawiono temat WTE pod kątem przetwarzania konkretnego rodzaju odpadu komunalnego na energię, jak np. opakowania po produktach spożywczych, osady ściekowe, odpady medyczne itp. W publikacji [30] włoscy naukowcy przedstawili porównanie możliwych rozwiązań zgazowania zużytych postaci opakowań po produktach spożywczych PDF (ang. Packaging Derived Fuel) w energię na małą skalę (0,2 ÷ 1 MWe). Parametry środowiskowe, energetyczne i ekonomiczne zostały oszacowane na podstawie danych eksperymentalnych i specyfikacji producenta opakowań. Sporządzono bilanse masy i energii oraz analizy przepływu materiałów i substancji w celu oceny i porównania rozwiązań projektowych przeznaczonych dla przemysłu. W artykule [80] wyniki badania emisji CO oraz NO podczas współspalania odpadów dywanowych w piecu obrotowym. Ciągłe podawanie rozdrobnionych włókien dywanowych i podkładu dywanowego, w tempie do 30 % całkowitego wkładu energetycznego, skutkowało prawie zerowym wzrostem emisji CO i innych produktów niepełnego spalania w porównaniu z opaleniem pieca wyłącznie gazem ziemnym. Emisja NO wzrosła przy współspalaniu odpadów dywanowych ze względu na zawartość azotu we włóknach nylonowych o 3 ÷ 8%. Skład przykładowego badanego dywanu pokazano w tabeli 2.1, która obrazuje ilość różnorodnych pierwiastków chemicznych mogących dostać się do atmosfery w wyniku nieodpowiedniej jego utylizacji.

Tab. 2.1. Wyniki oznaczenia udziałów masowych różnych pierwiastków w materiale dywanu [42]

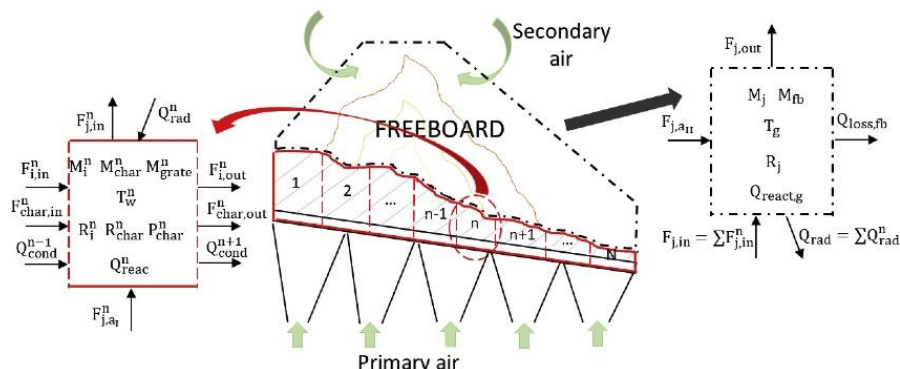
Pierwiastek	Włókno dywanowe [%] faza stała	Pył z materiału dywanu [%] faza gazowa
Al	0,0473	0,2500
Br	0,0122	0,0025
Ca	1,0100	9,840
Cl	0,0443	0,184
Co	0,0017	<i>nw</i>
Cr	<i>nw</i>	0,0006
Cs	0,0013	<i>nw</i>
Cu	0,0027	<i>nw</i>
F	0,0240	<i>nw</i>
Fe	0,0184	0,0713
I	0,0018	<i>nw</i>
K	0,0233	0,0572
Mg	0,0169	0,3220
Mn	0,0006	0,0040
Na	0,0717	0,2800
P	0,0152	0,0366
S	0,1070	0,1990
Sb	<i>nw</i>	0,0051
Si	0,0266	0,2660
Sr	<i>nw</i>	0,0083
Ti	0,1260	0,1160
Zn	0,0018	0,0083
<i>nw</i> - nie wykryto		

Analiza wykorzystania stałych odpadów komunalnych i osadów ściekowych w ramach inicjatywy WTE w formacie wielkoskalowym na terenie Hiszpanii było tematem pracy [42]. Analizę techniczno-ekonomiczną przeprowadzono zgodnie z usystematyzowaną procedurą, mającą na celu określenie optymalnych warunków eksploatacji oraz oszacowanie kosztów produkcji i inwestycji obiektów w funkcji zdolności przetwarzania odpadów. Na poziomie procesu analizowano przekształcanie odpadów MSW i osadów w energię, opracowując optymalny proces obejmujący spalanie odpadów, oczyszczanie gazów spalinowych, wytwarzanie energii i system chłodzenia. Określenie aspektów technicznych i ekonomicznych miało na celu sformułowanie problemu lokalizacji obiektu na terenie Hiszpanii. W pracach [20, 21] Janusz Wojciech Bujak podjął tematykę wykorzystania potencjału energetycznego odpadów medycznych. Opisane w artykule [21] badania obejmowały odzysk energii

elektrycznej i ciepła z instalacji spalania odpadów medycznych o wydajności 220 kg/h. Badania przeprowadzono w dużym obiekcie szpitalnym. Badana instalacja składała się z trzech podstawowych elementów: wytwornicy pary z odzyskiem ciepła, mikroturbiny wytwarzającej energię elektryczną oraz wymiennika ciepła (para-woda). Z kolei w artykule [20] opisano badania eksperymentalne przeprowadzone na dwóch układach odzysku ciepła z pary nasyconej, określanymi jako HRSG (ang. Heat Recovery Steam Generators). Systemy odzysku ciepła były jednym z elementów systemu termicznego przekształcania (spalania) odpadów medycznych. Obie instalacje HRSG zostały wyposażone w zespoły do czyszczenia pierwotnej powierzchni wymiany ciepła po stronie spalin. Systemy HRSG zostały przeanalizowane pod względem energetycznym i ekonomicznym.

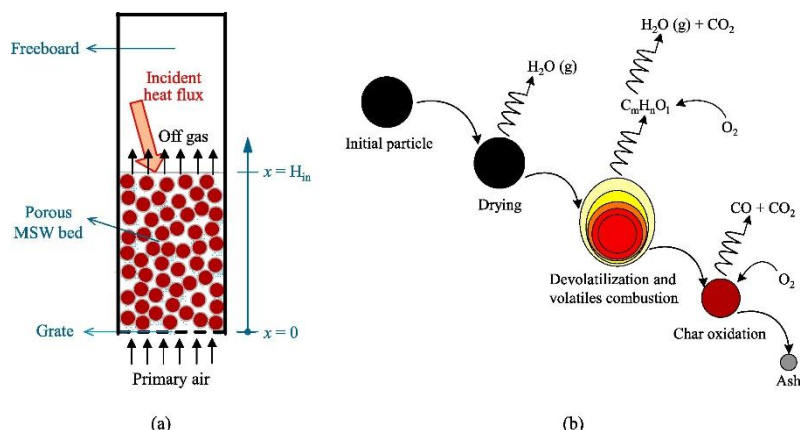
Kolejną grupę tematyczną zlokalizowano wokół analizy wykorzystania WTE pod kątem współspalania odpadów komunalnych z paliwami różnego pochodzenia. W pracy [41] przedstawiono badanie współspalania odpadów komunalnych i węglowodorów w warunkach nieizotermicznych. W badaniach wykorzystano analizator termogravimetryczny TGA (ang. Thermogravimetric Analysis) sprzężony z spektrometrem podczerwieni z transformacją Fouriera. Z kolei w artykule [90] przedstawiono badania wpływu stałych odpadów komunalnych poddanych obróbce hydrotermicznej na charakterystykę współspalania z węglem różnych klas, tj. węglem indyjskim, indonezyjskim i australijskim. Mieszanki MSW 10 %, 20 %, 30 % i 50 % (wt.%) z węglami różnej klasy badano podobnie za pomocą analizatora termogravimetrycznego w zakresie temperatur od otoczenia do 700 °C przy szybkości ogrzewania 10 °C/min.

Osobną grupę stanowią prace wykorzystujące symulacje numeryczne do różnorodnej analizy procesów zachodzących podczas przechowywania, transportu, przetwarzania i utylizacji odpadów, w tym jego spalania. W publikacji [50] przedstawiono przegląd badań numerycznych dotyczących termicznego przekształcania stałych odpadów komunalnych w spalaniu w złożu upakowanym. Na podstawie przeglądu właściwości chemicznych, termofizycznych oraz heterogenicznego charakteru MSW przeprowadzono dyskusję na temat przydatności dostępnych metod numerycznych. W pracy [44] przeprowadzono zaawansowane symulacje obliczeniowe dynamiki płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) dla kotła z ruchomym rusztem o wydajności 750 t/d MSW w celu lepszego uwzględnienia zmian surowca w związku z klasyfikacją odpadów. W artykule [174] przedstawiono obliczenia cieplno-przepływowe dla zakładu termicznego unieszkodliwiania odpadów oraz modelowanie CFD rozprzestrzeniania się gazów w kontekście struktur urbanistycznych. Celem modelowania CFD było określenie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych (CO, CO₂, SO₂, NO_x), powstających w wyniku spalania odpadów komunalnych w spalarni, aby uzyskać ich przybliżone wartości z odległości 1 km od wylotu komina. W artykule [83] opracowano kompleksowy model dynamiczny instalacji przetwarzania odpadów na energię z ruchomym rusztem za pomocą oprogramowania MATLAB Simulink. Celem było opracowanie niezawodnego i elastycznego modelu, który może odtworzyć dynamiczne reakcje komory spalania i kotła. W tym celu zarówno przy opracowywaniu modelu, jak i do walidacji, wykorzystano obszerną liczbę danych procesowych. Na rysunku 2.4 przedstawiono graficzny schemat komory spalania kotła z wyodrębnionymi strefami spalania. Procesy spalania zachodzące na powierzchni rusztu (paliwa), ponad nim oraz w strefie dopalania powyżej płomieni są bardzo zróżnicowane i zależą od wielu czynników. Wprowadzenie zróżnicowanego odpadu komunalnego jako paliwa w procesie jego spalania lub współspalania istotnie rozbudowuje schemat możliwych reakcji chemicznych zachodzących w komorze spalania kotła.



Rys. 2.4. Strefy spalania w kotle opalanym paliwem stałym o ruszcie pochyłym [83]

W publikacji [45] opracowano kompleksowy model do symulacji spalania odpadów stałych w złożu upakowanym, który wnosi innowacyjne rozwiązania techniczne dzięki poprawionym warunkom brzegowym, jednorodnym reakcjom i metodzie obliczania produktów pirolizy. Model został z walidowany przez dedykowane badanie eksperymentalne opisane w literaturze. Złożoność procesu obrazuje schemat reakcji pokazany na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Schemat reaktora ze złożem upakowanym (a) i ilustracja różnych podprocesów syntezy zachodzących w strefie reakcyjnej (b) [45]

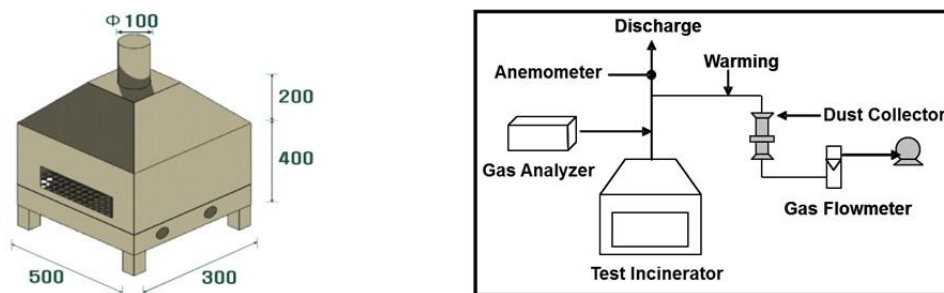
Należy jednak zauważyć, że oprócz spalania odpadów komunalnych w specjalnie zaprojektowanych do tego celu spalarniach, istnieje możliwość spalania odpadów w gospodarstwach domowych. W tym zakresie wiedzy ilość publikacji naukowych jest już niewielka i dotyczy głównie spalania odpadów na otwartej przestrzeni. W artykule [60] dokonano przeglądu dostępnych systemów gospodarowania odpadami w gospodarstwach domowych takich jak: biologiczne (kompostowanie lub fermentacja beztlenowa) oraz fizykochemiczne (spalanie czy piroliza). W artykule zauważono, że spalanie odpadów zmieszanych na otwartej przestrzeni jest we współczesnych społeczeństwach zabronione, ponieważ stanowi poważne zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi. Wskazano na istotną rolę zasobności gospodarstwa domowego w kontekście sposobu zagospodarowania odpadów domowych, co pokazuje tabela 2.2. W szczególnych przypadkach uzasadnione może być spalanie biomasy, przy zapewnieniu odpowiednich warunków.

Tab. 2.2. Metody zarządzania odpadami w różnych grupach dochodowych [60]

Metoda	Dochód w gospodarstwie domowym			
	Wysoki	Wyższy średni	Średni	Niski
Wysypywanie	0 %	32 %	49 %	13 %
Składowanie	43 %	59 %	11 %	59 %
Kompostowanie	11 %	1 %	2 %	2 %
Recykling	22 %	1 %	5 %	1 %
Spalanie	21 %	0 %	0 %	1 %
Inne	4 %	6 %	33 %	26 %

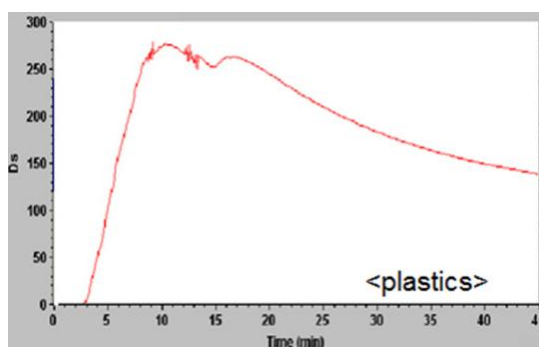
W publikacji [103] przedstawiono wpływ nieregularnego spalania na otwartej przestrzeni na lokalną jakość powietrza w obszarze metropolitalnym Seulu w Korei. Charakterystykę spalania odpadów zbadano za pomocą testowej komory spalania. Próbkę miały różną charakterystykę w zależności od porcji. Odpadowe tworzywa sztuczne wytworzyły największą ilość substancji szkodliwych spośród wszystkich próbek. Na podstawie ankiety przeprowadzonej na badanym obszarze oszacowano, że średnie roczne emisje materiałów niebezpiecznych z częstego spalania na otwartym powietrzu wyniosły 71 ton dla PM10, 46.6 ton dla PM2.5, 914 kg dla metali ciężkich i 67 kg dla WWA. Otwarte spalanie powoduje prawie 0.44 % regionalnego zanieczyszczenia powietrza PM10. Praca ta jest z wszystkich przeanalizowanych najbliższa idei oceny wpływu obciążeń atmosfery wynikających ze spalania w domu odpadów w celu ich utylizacji lub pozyskania energii cieplnej. Badania te jednak miały charakter modelowy, gdyż proces spalania prowadzono w modelowej gazowej komorze

o kontrolowanej sprawności utleniania substratów. Na rysunku 2.6 przedstawiono tor pomiarowy oraz model zastosowanej w pomiarach komory spalania.



Rys. 2.6. Schemat komody spalania (wymiary w mm) oraz toru pomiarowego [103]

Na rysunku 2.7 przedstawiono przykładowy profil czasowy gęstości właściwej dymu (D_s) podczas współspalania plastiku z gazem. Dym definiowany jest przez autorów jako cząstki stałe uwalniane podczas spalania dowolnego palnego materiału doprowadzonego do komory spalania kotła gazowego. Podczas prób na palenisko gazowe wkładano odpad o różnym pochodzeniu. Ewolucja profilu czasowego spalin, w tym wydłużony czas, czas spalania i maksymalną intensywność, różniły się w zależności od rodzaju spalanej materiału. Średnie uzyskane wskaźniki emisji oparte na masie zestawiono w tabeli 2.3 i odniesiono do kilograma spalanej paliwa.



Rys. 2.7. Profil czasowy gęstości właściwej dymu emitowanej podczas spalania plastiku [103]

Tab. 2.3. Wyniki badań emisji pyłów podczas spalania różnych odpadów [103]

Materiał	EF [mg/kg]			EF [%] (PM _{2.5} /PM ₁₀)	THM [mg/kg]	PAH [mg/g]	
	TPM	PM ₁₀	PM _{2.5}			TPM	PM _{2.5}
papier	1300	930	600	64.5	9.77	0.41	3.59
drewno	1000	830	500	60.2	8.14	0.79	1.47
plastik	1700	1500	500	33.3	27.09	1.94	14.35
MSW	1500	1200	780	65	13.39	1.12	1.91

*EF: współczynnik emisji

*PAH: węglowodory poliaromatyczne

*PM: Pył zawieszony

*TPM: Całkowity pył zawieszony

*THM: zawartość metali ciężkich: Pb, Ni, Cu, Cd, Cr i Zn

W literaturze brakuje aktualnych publikacji dotyczących spalania lub współspalania odpadów komunalnych w kotłach na paliwo stałe w gospodarstwach domowych. Wynika to między innymi z faktu, że w większości społeczeństw taki proceder jest niezgodny z prawem. Prowadzi to do ukrywania informacji, niechętnego dzielenia się informacjami lub ich fałszowaniu. Celowe jest więc wykonanie badań eksperymentalnych bardziej adekwatnych do realiów życia codziennego. Należy wykonać badania spalania odpadów domowych lub jej mieszanin w urządzeniach domowych powszechnie stosowanych w gospodarstwach domowych. Dane te uzupełnią stan wiedzy o procesach przetwórstwa odpadów komunalnych mających negatywny wpływ na środowisko naturalne.

5. Teza i cele pracy

Kotły o małej mocy na paliwa stałe stanowią bardzo intensywnie rozwijający się sektor produkcji urządzeń energetycznych. Polska należy do czołówki państw europejskich w tej dziedzinie. Szacuje się, że roczna produkcja kotłów o małej mocy na paliwa stałe wynosi w naszym kraju około 180 tys. sztuk [146]. Przeprowadzone badania pokazały, że urządzenia na paliwa stałe wytwarzają ciepło na potrzeby aż 51,1% gospodarstw domowych [147].

Powstałe akty prawne opisane w rozdziale 4 wymusiły na producentach kotłów o małej mocy wdrażanie nowych technologii oraz konstrukcji mających na celu zwiększenie ich efektywności energetycznej, oraz poprawę ich aspektów w zakresie emisji zanieczyszczeń. Udoskonalone technologie kotłów na paliwa stałe wykorzystywane w sektorze komunalno-mieszkaniowym pozwalają na coraz bardziej efektywne oraz nisko emisyjne spalanie.

W związku z powyższym główną przyczyną wysokiej emisji zanieczyszczeń nie jest technologia oraz konstrukcja kotłów grzewczych, a ich niewłaściwa eksploatacja w gospodarstwach domowych. Podstawowym powodem odpowiedzialnym za wysoką emisję zanieczyszczeń jest spalanie niskiej jakości paliw stałych oraz spalanie lub współspalanie odpadów w sektorze komunalno-mieszkaniowym.

W Polsce wytwarza się rocznie ok. 14,5 mln ton odpadów komunalnych, w tym ok. 4,5 mln ton tzw. odpadów resztkowych, nienadających się do powtórnego wykorzystania ani recyklingu [56]. Szacuje się, że w Polsce każdego roku ok. 200 kg odpadów komunalnych na osobę jest spalane w domowych urządzeniach grzewczych lub wyrzucane np. do lasów niezgodnie z przepisami ustawy o odpadach [148]. Na przykład ponad 50% mieszkańców Małopolski wciąż zauważa proceder spalania odpadów w swojej okolicy [149]. W raporcie przygotowanym przez Polski Alarm Smogowy opisano, jak wygląda kontrola domowych pieców i kotłów oraz egzekucja przepisów dotyczących spalania odpadów. Badaniami objęto 106 gmin z czterech województw: łódzkiego (25 gmin), małopolskiego (28 gmin), śląskiego (28 gmin) i mazowieckiego (25 gmin). W trakcie badań zdiagnozowano szereg przyczyn, dla których kontrole są nieskuteczne [150]. Należą do nich:

- niewystarczająca liczba funkcjonariuszy straży miejskiej lub urzędników upoważnionych do przeprowadzenia kontroli, co przekłada się na długi czas reakcji,
- kontrole w gospodarstwach domowych mogą być przeprowadzane w godzinach między 6 a 22, a więc w innych godzinach niż dorzucane jest zazwyczaj paliwo lub odpad do urządzeń grzewczych, co z kolei zmniejsza szanse na złapanie popełniającego wykroczenie na gorącym uczynku,
- kontrole przeprowadzane są w godzinach pracy urzędu między 8 a 16, a więc w innych godzinach niż dorzucane jest zazwyczaj paliwo do pieca,
- urzędnicy nie są uprawnieni do wystawiania mandatu, a procedura skierowania sprawy do sądu skąpą likowana i czasochłonna,
- w mniejszych miejscowościach urzędnicy są mocno osadzeni w społeczności lokalnej, co prowadzi do sytuacji, gdzie kontrolują swoich znajomych, sąsiadów lub rodzinę,

Kolejnym powodem braku wykrywalności nielegalnego spalania odpadów w gospodarstwach domowych jest nieprzeprowadzanie kontroli w wyniku braku zgłoszenia podejrzenia spalania odpadów odpowiednim organom. Wynika to z mocno zakorzenionej w polskiej kulturze niechęci składania tzw. donosów obywatelskich.

Co prawda podstawą do kontroli mogą być także obserwacje funkcjonariuszy straży gminnej (miejskiej) lub urzędników gminy, jednak w takich przypadkach jest konieczne zlokalizowanie źródła emisji zanieczyszczeń. Do tego celu wykorzystywane są specjalistyczne drony z zamontowanymi analizatorami spalin, jednak ich zakup oraz obsługa jest bardzo kosztowna.

Samo przeprowadzenie kontroli jest również trudne do przeprowadzenia oraz kłopotliwe zarówno dla osób przeprowadzających kontrolę, jak i osoby kontrolowanej. W celu przeprowadzenia kontroli przeprowadzane jest, przed rozpoczęciem poboru próbek, oględzin miejsca kontroli w celu ustalenia stanu faktycznego. Ustalana jest liczba palenisk grzewczych, rodzaje spalanych paliw oraz miejsca składowania opału i jego ilości. Sprawdzeniu podlega również sposób segregacji i gromadzenia odpadów, w celu sprawdzenia zgodności z przepisami. Podczas oględzin następuje także otwarcie komory spalania urządzenia grzewczego przez kontrolowanego i sprawdzenie, czy w palenisku

spalane mogą być odpady. W tym celu konieczne często jest wygaszenie paleniska, co jest uciążliwe dla mieszkańców gospodarstwa. Na miejscu wykonuje się również dokumentację fotograficzną wraz z odpowiednią numeracją zdjęć. Gdy istnieje podejrzenie, że w palenisku może dochodzić do spalania odpadów, próbki powinny zostać pobrane, a ich badanie zlecone. Pobór popiołu jest kluczowy do określenia parametrów jakościowych spalanych materiałów, przez co powinien on odbywać się zgodnie z zasadami. Ze względów bezpieczeństwa, kontrolujący powinien być wyposażony w środki ochrony (np.: rękawice ochronne, maskę przeciwpyłową, okulary, latarkę czołową, czujnik gazowy wieloparametrowy oraz kombinezon lub kurtkę ogniotrwałą, która przylega do ciała). Jeśli zostanie stwierdzone, że środki ochrony osobistej lub wyposażenie niezbędne do poboru próbek nie spełniają wymogów bezpieczeństwa i higieny pracy, kontrolę można zakończyć i powiadomić o zajściu przełożonego. Próbki mogą zostać pobrane jedynie przez upoważnionego kontrolującego [151].

W związku z przedstawionymi powyżej przyczynami wpływającymi na brak wykrywalności nielegalnego spalania odpadów oraz na nieskuteczności przeprowadzanych kontroli powstaje potrzeba opracowania nowej skuteczniejszej metody identyfikacji niewłaściwej eksploatacji urządzeń grzewczych w tym zakresie.

Metoda ta powinna być odpowiedzią na niedociągnięcia w aktualnym systemie kontroli nielegalnego spalania odpadów w gospodarstwach domowych i cechować się:

- niskim kosztem,
- niską potrzebą zaangażowania urzędników potrzebnych do przeprowadzenia kontroli,
- możliwością stałego monitoringu prawidłowej eksploatacji kotłów np. na podstawie zawartości tlenu w spalinach,
- możliwością sprawdzenia historii eksploatacji kotła (możliwość sprawdzenia, czy w przeszłości nie doszło do naruszenia przepisów)
- możliwością wykrycia spalania odpadów bez ingerencji w pracę kotła na paliwo stałe.

W związku z potrzebą opracowania nowej skuteczniejszej metody identyfikacji niewłaściwej eksploatacji kotłów na paliwo stałe powstaje teza:

Czy możliwe jest opracowanie algorytmu pozwalającego na identyfikację niewłaściwej eksploatacji kotła na paliwo stałe poprzez analizę zawartości tlenu w spalinach?

W celu uzasadnienia wyżej postawionej tezy należy zrealizować pięć niżej wymienionych celów.

Pierwszym celem jest wytypowanie oraz przeprowadzenie badań chemicznych i technicznych odpadów komunalnych służących jako paliwo w przeprowadzonych badaniach symulujących niewłaściwą eksploatację.

Drugim celem jest wybór odpowiednich modeli kotłów na paliwo stałe, na których zostaną przeprowadzane badania. Wybór modeli powinien być podyktowany na podstawie ich popularności wśród użytkowników kotłów w Polsce. Pod uwagę w wyborze należy wziąć również obostrzenia zawarte w Rozporządzeniach Parlamentu Europejskiego.

Trzecim celem zbudowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego przeprowadzenie badań. Stanowisko pomiarowe powinno zostać wyposażone w czujniki i rejestratory odpowiednich parametrów w celu ich analizy.

Czwartym celem jest przeprowadzenie wieloetapowych badań na zbudowanym stanowisku pomiarowym. Badania zostaną przeprowadzone na wybranych modelach kotłów na paliwo stałe z wykorzystaniem wcześniej wytypowanych partii odpadów komunalnych.

Ostatnim piątym celem będzie analiza uzyskanych wyników badań i ocena skuteczności identyfikacji niewłaściwej eksploatacji kotłów na podstawie pomiaru zawartości tlenu w spalinach oraz ocena możliwości zastosowania proponowanej technologii.

3. Teza i cele pracy

Kotły małej mocy na paliwa stałe stanowią intensywnie rozwijający się sektor produkcji urządzeń energetycznych. Polska należy do czołówki państw europejskich w tej dziedzinie gospodarczej. Szacuje się, że roczna produkcja kotłów małej mocy na paliwa stałe wynosi w naszym kraju około 180 tys. sztuk [72]. Realizowane na przestrzeni minionych lat badania wykazują, że urządzenia na paliwa stałe wytwarzają ciepło na potrzeby 51,1 % gospodarstw domowych [99]. Powstałe akty prawne, opisane w rozdziale pierwszym, wymuszają na producentach kotłów małych mocy wdrażanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Powoduje to obniżenie zużycia paliw poprzez zwiększenie sprawności oraz istotną redukcję szkodliwych produktów spalania emitowanych do atmosfery. Udoskonalone technologie kotłów na paliwa stałe, wykorzystywane w sektorze komunalnym oraz przemysłowym o małym zapotrzebowaniu na moc grzewczą, pozwalają na coraz bardziej efektywne spalanie paliw kopalnych. Należy więc zaznaczyć, że główną przyczyną wysokiej emisji zanieczyszczeń nie jest stosowana technologia, konstrukcja kotłów grzewczych, ale ich niewłaściwa eksploatacja w gospodarstwach domowych i przemysłowych.

Podstawowym powodem odpowiedzialnym za wysoką emisję zanieczyszczeń jest spalanie niskiej jakości paliw stałych oraz spalanie lub współspalanie odpadów w sektorze komunalnym. Według raportu „Ochrona środowiska 2021” w Polsce wytwarza się rocznie ok. 14,5 mln ton odpadów komunalnych, w tym ok. 4,5 mln ton tzw. odpadów resztkowych, nienadających się do powtórnego wykorzystania oraz do recyklingu [97]. Szacuje się, że w Polsce każdego roku ok. 200 kg odpadów komunalnych na osobę spalanych jest w domowych urządzeniach grzewczych lub wyrzucanych, np. do lasów, niezgodnie z przepisami ustawy o odpadach [137]. Przeprowadzone badania np. w Małopolsce wskazują, że ponad 50 % mieszkańców wciąż zauważa proceder spalania odpadów w swojej okolicy [54]. W raporcie przygotowanym przez Polski Alarm Smogowy opisano, jak wygląda kontrola domowych pieców i kotłów oraz egzekucja przepisów dotyczących spalania odpadów. Badaniami objęto 106 gmin z czterech województw: łódzkiego (25 gmin), małopolskiego (28 gmin), śląskiego (28 gmin) i mazowieckiego (25 gmin). Podczas badań zdiagnozowano szereg przyczyn, które powodują, że kontrole są nieskuteczne lub ich skuteczność jest niewystarczająca [122]. Należą do nich:

- niewystarczająca liczba funkcjonariuszy straży miejskiej lub urzędników upoważnionych do przeprowadzenia kontroli, co przekłada się na długi czas reakcji na zgłoszenie,
- kontrola w gospodarstwach domowych może być przeprowadzana w godzinach między 6:00 a 22:00, czyli w innych godzinach, niż praktykowane jest spalanie odpadów w urządzeniach grzewczych,
- bardzo często kontrola przeprowadzana jest w godzinach pracy urzędów, czyli pomiędzy 8:00 a 16:00, a więc w innych godzinach, niż paliwo jest dodawane do urządzeń grzewczych w cyklu dobowej eksploatacji,
- urzędnicy nie są uprawnieni do wystawiania mandatu, a procedura skierowania sprawy do rozstrzygnięcia przez sąd jest skomplikowana i czasochłonna,
- w licznych przypadkach urzędnicy są mocno osadzeni w społeczności lokalnej, co prowadzi do sytuacji konfliktu z współmieszkańcami, sąsiadami lub rodziną.

W związku z powyższymi przyczynami nieskuteczności przeprowadzanych kontroli należałoby wprowadzić modyfikacje w istniejących procedurach poprzez:

- zwiększenie personelu oraz usprawnienie procedury przeprowadzania dozoru,
- umożliwienie sprawdzania i analizy palenisk w gospodarstwach domowych przez całą dobę w przypadku zgłoszenia podejrzenia lub okresowej wyrywkowej kontroli,
- opracowanie systemu umożliwiającego scentralizowaną analizę danych najlepiej gromadzonych zdalnie, co pozwalałoby na budowę bazy gwarantującej skuteczniejsze działanie organów kontrolnych.

Aktualnie podejmuje się próby zmodernizowania systemu kontroli na podstawie powyższych wniosków. Podstawą do kontroli mogą być codzienne obserwacje funkcjonariuszy straży gminnej (miejskiej) lub urzędników gminy. W takich przypadkach konieczne jest dodatkowo precyzyjne wskazanie źródła, co wymusza użycie dodatkowych środków podczas patroli. Do tego celu

wykorzystywane są specjalistyczne drony z zamontowanymi analizatorami spalin, jednak ich zakup oraz obsługa jest kosztowna. Samo przeprowadzenie kontroli jest również złożoną procedurą podczas jej realizacji. Na początku przeprowadzane są oględziny podejrzanego o spalanie odpadów gospodarstwa, w celu ustalenia liczby palenisk grzewczych, rodzaju spalanego paliwa oraz miejsca składowania opału i jego ilości. Kolejnym krokiem jest kontrola pod kątem zgodności z przepisami, podlega jej również sposób segregacji i gromadzenia odpadów. Podczas oględzin kotłowni następuje otwarcie drzwiczek urządzenia grzewczego i sprawdzenie rodzaju stałego produktu spalania zgromadzonego w popielniku i na ruszcie. W tym celu konieczne jest wygaszenie paleniska, co bywa uciążliwe w warunkach praktycznych. Na miejscu wykonuje się dokumentację fotograficzną wraz z odpowiednią numeracją zdjęć pozwalających na udokumentowanie czynności w raporcie. Gdy istnieje podejrzenie, że w palenisku może dochodzić do spalania odpadów, powinny zostać pobrane próbki, a ich badanie zlecone niezależnemu ośrodkowi. Pobór stałych produktów spalania jest kluczowy do określenia parametrów jakościowych spalanych materiałów, przez co powinien odbywać się zgodnie z przyjętymi zasadami. Ze względów bezpieczeństwa, kontrolujący powinien być wyposażony w środki ochrony (np.: rękawice ochronne, maskę przeciwpyłową, okulary, latarkę czołową, czujnik gazowy wieloparametrowy oraz kombinezon lub kurtkę ogniotrwałą). Jeśli zostanie stwierdzone, że środki ochrony osobistej lub wyposażenie niezbędne do poboru próbek nie spełniają wymogów bezpieczeństwa i higieny pracy, kontrolę można zakończyć i powiadomić o zajściu przełożonego. Próbki mogą zostać pobrane jedynie przez upoważnionego kontrolującego [120] przy zachowaniu obowiązujących procedur. Mała wykrywalność nielegalnego spalania odpadów oraz nieskuteczność przeprowadzanych kontroli stwarza przesłanki do opracowania nowego zadania badawczego, czyli opracowania nowej skuteczniejszej metody identyfikacji niewłaściwej eksploatacji urządzeń grzewczych. Metoda ta powinna ograniczać skutki wad w aktualnie funkcjonującym systemie nadzoru nielegalnego spalania odpadów w gospodarstwach domowych i cechować się:

- niską potrzebą zaangażowania urzędników potrzebnych do przeprowadzenia kontroli,
- możliwością stałego monitoringu prawidłowej eksploatacji kotłów np. na podstawie zmian zawartości różnych składników w spalinach,
- możliwością sprawdzenia „historii” eksploatacji kotła (możliwość sprawdzenia, czy w przeszłości nie doszło do naruszenia przepisów),
- niskim kosztem,
- możliwością wykrycia spalania odpadów bez ingerencji w pracę kotła na paliwo stałe.

W związku z potrzebą opracowania nowej skuteczniejszej metody wykrywania niewłaściwej eksploatacji kotłów na paliwo stałe można sformułować tezę badawczą:

Możliwe jest opracowanie procedury pozwalającej na identyfikację niewłaściwej eksploatacji kotła na paliwo stałe opartą o analizę zawartości tlenu w emitowanych spalinach?

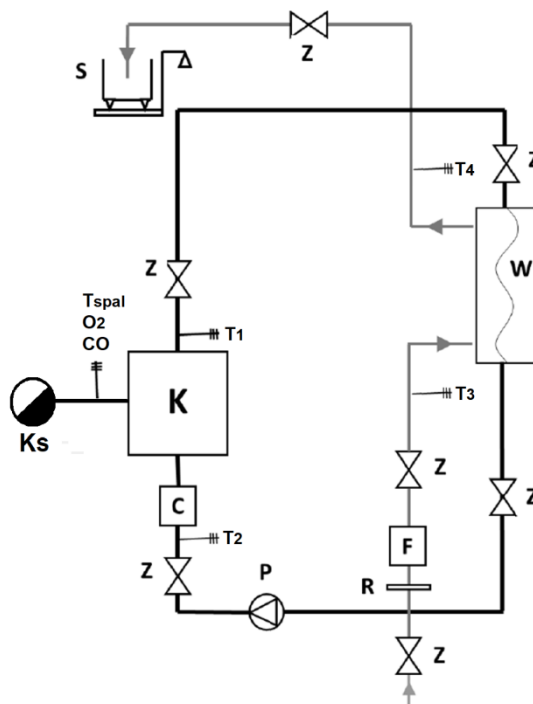
W celu odpowiedzi na pytanie stawiane w tezie należy zrealizować pięć zadań badawczych. Pierwszym zadaniem był wybór odpowiednich modeli kotłów na paliwo stałe, na których zostaną przeprowadzane badania. Wybór modeli powinien być podyktowany ich jak najwyższą popularnością wśród użytkowników kotłów w Polsce. Drugim etapem było zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego przeprowadzenie badań. Stanowisko pomiarowe powinno zostać zaprojektowane i wyposażone w czujniki i rejestratory pozwalające na uzyskanie wiarygodnych wyników cechujących się niskim błędem. Trzecim celem było wytypowanie oraz przeprowadzenie badań chemicznych i technicznych paliwa wzorcowego (zalecanego przez producenta kotła) oraz odpadów komunalnych służących jako paliwo w przeprowadzonych badaniach symulujących niewłaściwą eksploatację. Czwartym zadaniem było przeprowadzenie wieloetapowych badań na zbudowanym stanowisku pomiarowym. Badania były przeprowadzone na wybranych modelach kotłów na paliwo stałe z wykorzystaniem wcześniej wytypowanych partii odpadów komunalnych.

Podsumowanie pracy obejmować będzie analizę uzyskanych wyników badań i ostateczną ocenę skuteczności identyfikacji niewłaściwej eksploatacji kotłów na podstawie pomiaru zawartości tlenu w spalinach, jak również ocenę możliwości zastosowania proponowanej technologii w przyszłych badaniach, mających zagwarantować opracowanie skutecznej procedury kontrolnej. Skuteczność tej procedury powinna stwarzać przesłanki do twierdzeń o możliwym ograniczeniu obciążeń środowiskowych w sektorze komunalno-bytowym poprzez ograniczenie spalania odpadów.

4. Budowa stanowiska pomiarowego

4.1. Schematy pomiarowe

W celu opracowania metody identyfikacji nieprawidłowej eksploatacji urządzeń grzewczych w warunkach rzeczywistych zostały przeprowadzone badania na specjalnie zaprojektowanym stanowisku pomiarowym mieszczącym się na terenie Politechniki w laboratorium Konwersji Energii w Instytucie Energetyki Ciepłej. Na rysunku 4.1 pokazany został schemat stanowiska pomiarowego przedstawiający główne jego elementy, czyli: lokalizację kotła, zespołu wymienników ciepła wraz z armaturą hydrauliczną oraz torami pomiarowymi.



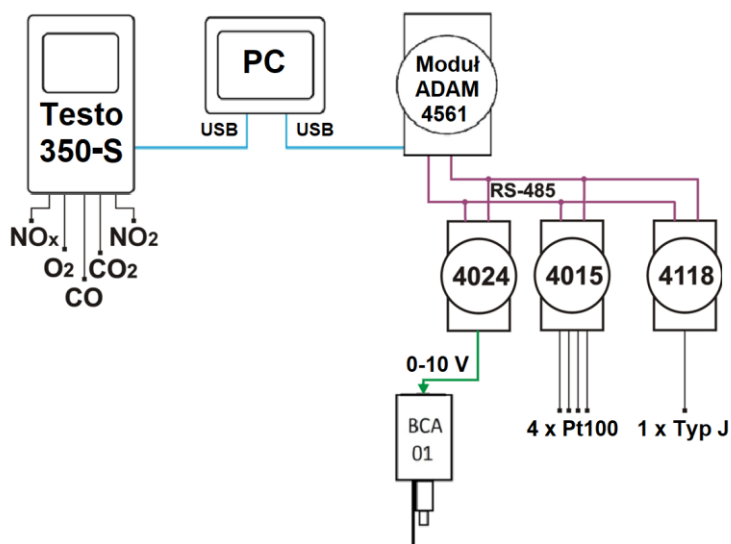
Rys. 4.1. Schemat stanowiska pomiarowego

K - kocioł, W - wymiennik ciepła, F - wodomierz, R - regulator przepływu, C - ciepłomierz, P - pompa, S - zbiornik umieszczony na wadze, Ks - komin, T₁ - czujnik temperatury wody wylotowej z kotła, T₂ - czujnik temperatury wody powrotnej do kotła, T₃ - czujnik temperatury wody na wejściu do wymiennika ciepła, T₄ - czujnik temperatury wody na wyjściu z wymiennika, T_{spal} - czujnik temperatury spalin, O₂ - czujnik zawartości tlenu w spalinach, CO - czujnik zawartości tlenku węgla w spalinach

Stanowisko pomiarowe zaprojektowane zostało zgodnie z wymogami normatywnymi obowiązującymi w Unii Europejskiej. Możliwe jest badanie kotła grzewczego obejmującego wyznaczenie mocy kotła, składu i ilości emitowanych spalin przy ciągłej kontroli dostarczanego paliwa. Możliwe jest połączenie hydrauliczne odbiorników ciepła w postaci wymienników w układach szeregowym i równoległym pozwalającym na pomiary dużych oraz bardzo małych przyrostów temperatury wody przepływającej przez wymienniki ciepła. Układ przepływowy wyposażony jest w przepływomierze oraz ciepłomierze i system pomiaru masy wody wypływającej z urządzeń grzewczych. Pomiary są dublowane w celu szybkiego wykrycia błędów znaczących oraz oceny dokładności pomiaru parametrów stanu i parametrów termodynamicznych. Automatyczny i skomputeryzowany system pomiaru zdublowany jest czujnikami stacjonarnymi cyfrowymi lub analogowymi pozwalającymi na losową weryfikację rejestrowanych parametrów.

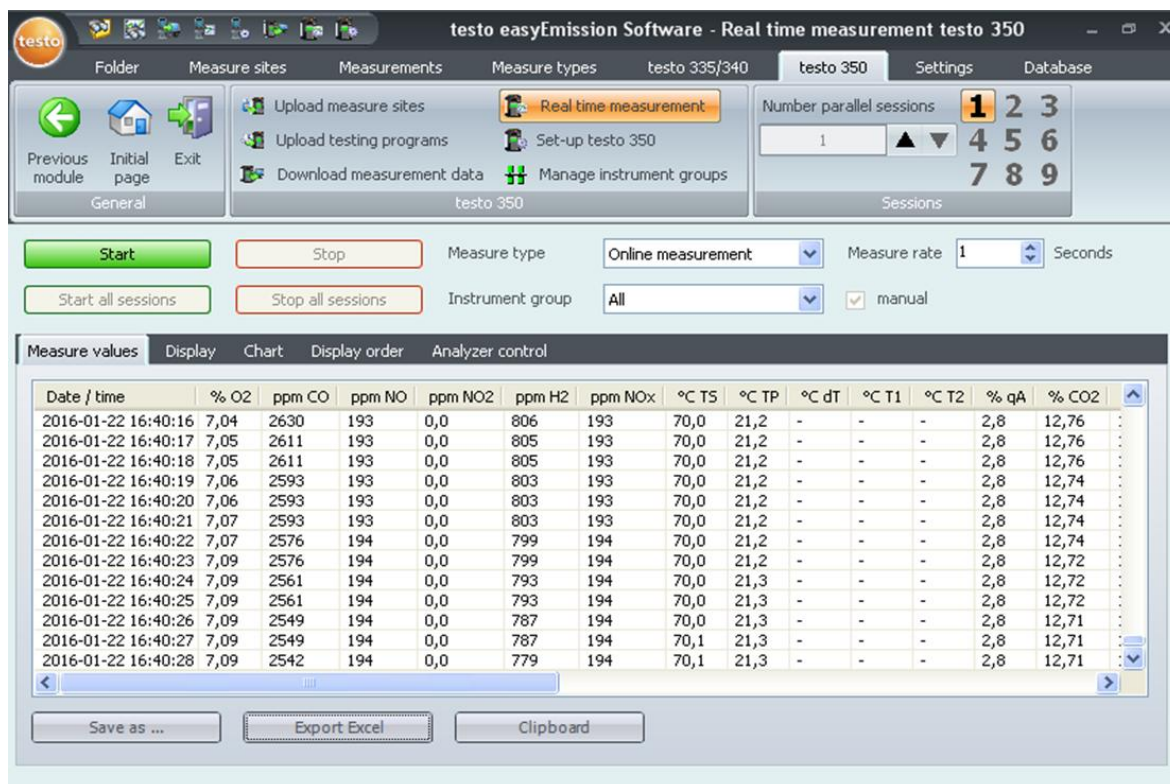
Głównym elementem badawczym stanowiska badawczego był zaprojektowany system pomiarowy, który umożliwił rejestrację wszystkich wytypowanych wielkości pomiarowych (rys. 4.2). Składał się on z: czterech czujników rezystancyjnych Pt100 do pomiaru temperatury wody cyrkulującej się

w instalacji, czujnika termoelektrycznego typu J do pomiaru temperatury spalin wylotowych z kotła oraz dwóch analizatorów spalin Brager BCA 01 i Testo 350-S. Układ pomiarowy pozwolił na rejestrację w czasie ciągłym następujących parametrów: temperatury wody wylotowej z kotła T_1 [°C], temperatury wody powrotnej do kotła T_2 [°C], temperatury wody na wejściu do wymiennika ciepła schładzającego wodę obiegową kotła T_3 [°C], temperatury wody na wyjściu z wymiennika ciepła T_4 [°C], temperatury spalin T_{spal} [°C], zawartości tlenku węgla w spalinach CO [ppm] oraz tlenu O_2 [%].

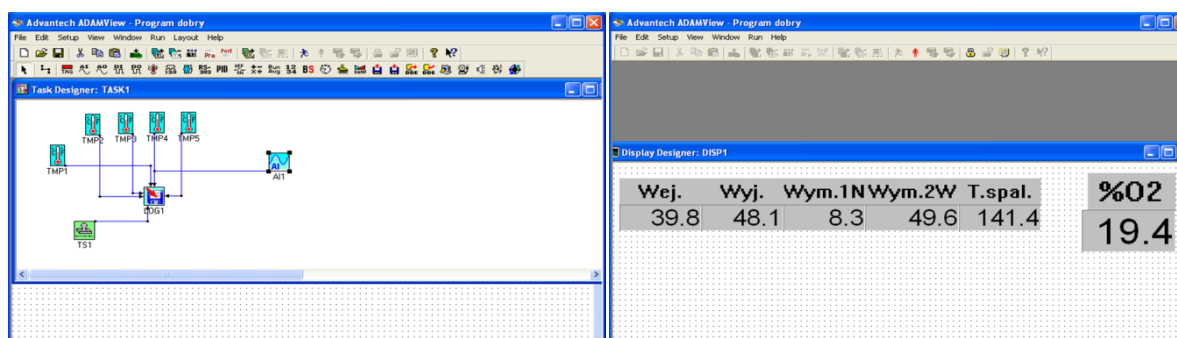


Rys. 4.2. Schemat połączeń czujników i rejestratorów w stanowisku pomiarowym

Zaprojektowany system pomiarowy składał się z dwóch niezależnych torów. Synchronizacja czasu rejestrowanych danych pomiarowych z interwałem czasowym wynoszącym 1 s, z dwóch niezależnych torów, odnosiła się do zegara systemowego komputera PC. Pierwszy tor stanowiska pomiarowego składał się z analizatora spalin Testo 350-S podłączonego bezpośrednio do układu komputerowego za pomocą interfejsu USB [143]. Analizator wykorzystywał program Testo Easy Emission, który umożliwiał bezpośredni pomiar i rejestrację wszystkich wyników pomiarów na komputerze (rys. 4.3). Na rysunku przedstawiono okno kontrolne programu, które umożliwia śledzenie aktualnych wskazań przekazywanych przez analizator spalin oraz ich archiwizację. Dane gromadzone są w tablicach edytowalnych w programie oraz w pakiecie MS Office, co ułatwiało późniejszą obsługę oraz porównywanie danych uzyskiwanych z drugiego toru pomiarowego. Drugi tor pomiarowy stanowiska badawczego wykorzystywał moduły firmy ADVENTECH serii ADAM 4000 i ADAM 4100 [1]. Dzięki swojej dokładności oraz odporności na silne zakłócenia elektromagnetyczne, moduły te są idealne do pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Niezależne układy mikroprocesorowe, które sterują pojedynczymi modułami, umożliwiają szybkie i niezawodne działanie. Komunikacja między poszczególnymi elementami odbywa się za pomocą popularnego w przemyśle standardu RS485. W celu rejestracji pomiarów wykorzystano program ADAMView firmy Adventech, który na podstawie odpowiednich procedur pomiarowych wykonywał zapis danych otrzymanych z czujników temperatury PT100, termopary typu J oraz sondy pomiarowej BCA-01 firmy Brager. Jest to program, który działa w środowisku graficznym i pozwala na implementację poszczególnych modułów ADAM (rys. 4.4). Procedura stworzona w środowisku ADAMView jest programem autorskim, dostosowanym w swym działaniu do potrzeb rejestracji wielkości gromadzonych przy użyciu modułów ADAM w trakcie badań laboratoryjnych.



Rys. 4.3. Okno programu Testo EasyEmission Software

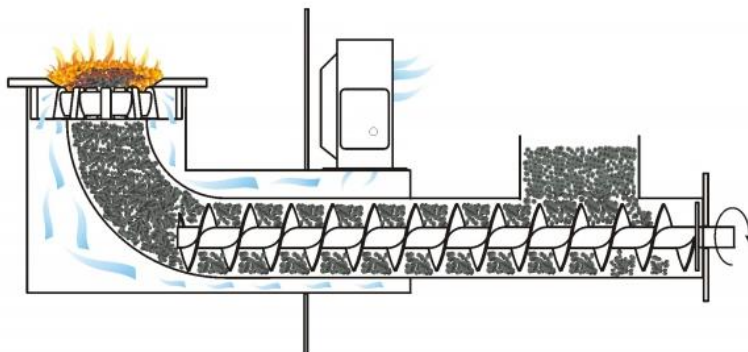


Rys. 4.4. Okna programu ADAMView

4.2. Kotły wytypowane do badań

Badania przeprowadzono na dwóch popularnych modelach kotłów na paliwo stałe stosowanych w gospodarstwach domowych. Pierwszy z nich to kocioł produkowany przez firmę Heiztechnik o nazwie modelu Q EKO 15, posiadający moc znamionową na poziomie 15 kW. Drugi to kocioł produkowany przez firmę Tilgner o nazwie modelu EKR 20 z mocą znamionową 20 kW. Posiadają one konstrukcję stalową i należą do grupy kotłów małej mocy przeznaczonych do ogrzewania gospodarstw domowych przy współpracy z pojemnościowym zasobnikiem c.w.u. Kotły mieszczą się w 3 klasie według kryteriów zawartych w normie PN-EN 303-5:2012. Wybór kotłów posiadających 3 klasę był podyktowany popularnością kotłów tej klasy wśród użytkowników w Polsce. Jest to spowodowane ich dostępnością na rynku od ok. 2010 r. oraz niską ceną w stosunku do kotłów posiadających klasę piątą. Kolejnym argumentem wyboru kotłów w 3 klasie jest konieczność ich wymiany na kotły spełniające wymagania projektu Ecodesign. Na przykład na obrzeże miasta Poznań dopiero w 2028 roku [149] przewidywana jest realizacja tego przedsięwzięcia. Kotły te sterowane są elektronicznie za pomocą regulatora pracy kotła wykorzystujący algorytm proporcjonalnie-całkująco-różniczkujący (PID), który pracuje na podstawie zadanej temperatury wody na wyjściu z kotła. Paliwo spalało się w małym palniku z automatycznie sterowanym przez regulator załadunkiem paliwa oraz regulowaną ilością powietrza wprowadzanego do komory spalania. Regulator pracy kotła

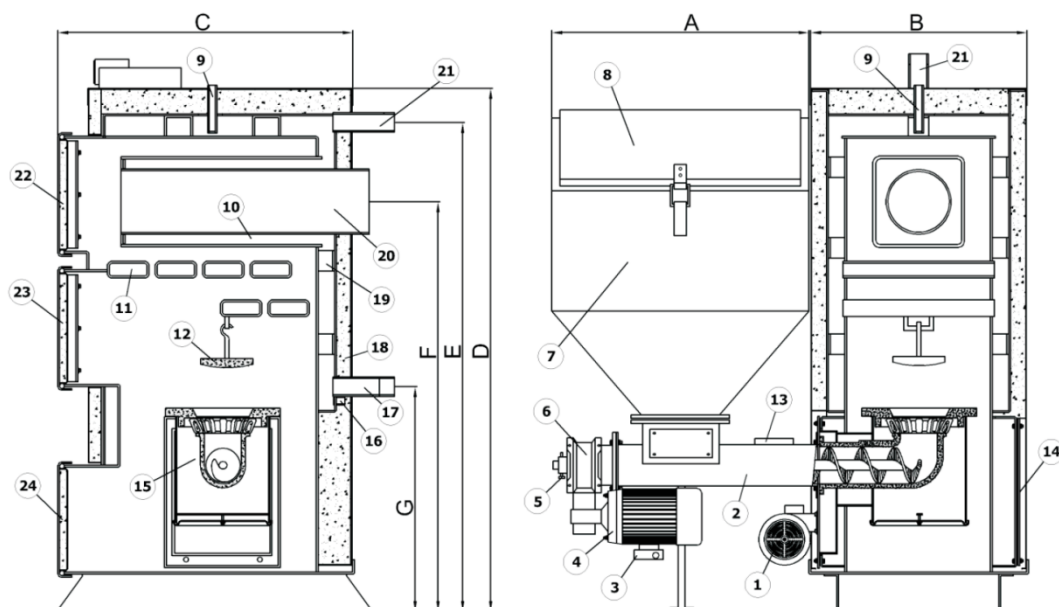
automatycznie sterował pracą retortowego ślimakowego podajnika paliwa oraz wentylatora. W tego typu sterowniku moc nadmuchu oraz ilość dostarczonego paliwa zależy bezpośrednio od mierzonej temperatury wody na wyjściu z kotła i różnicy tego parametru od wartości zadanej. Jednym z głównych elementów budowy palnika retortowego jest podajnik w kształcie ślimaka, przez którego palniki retortowe nazywane są również podajnikami ślimakowymi. Na rysunku 4.5 przedstawiono schemat działania palnika retortowego z zaznaczonymi strefami doprowadzanego powietrza z wentylatora oraz schematem jego redystrybucji w strefie spalania.



Rys. 4.5. Schemat działania palnika retortowego [67]

Podajnik ślimakowy pełni funkcję przenośnika śrubowego do przemieszczania paliwa spod zasobnika paliwa do retorty. Paliwo przemieszcza się grawitacyjnie z zasobnika paliwa do koryta podajnika, gdzie jest przesuwane w kierunku paleniska. Podajnik pracuje w sposób cykliczny. Za pomocą regulatora pracy kotła określany jest czas trwania cyklu podawania paliwa oraz cyklu przerwy, podczas którego paliwo jest dopalane. Część robocza palnika, która jest najczęściej wykonana z żeliwa, ma postać zgiętej rury, nazywanej popularnie kolanem lub fajką. Górną częścią paleniska jest żeliwna dysza, pod którą umieszczony jest pierścień z otworami doprowadzającymi powietrze. Powietrze jest tłoczone kanałami za pomocą wentylatora małej mocy, które następnie wdmuchiwane jest przez otwory w pierścieniu nadmuchowym pod strefę żaru w dyszy paleniska [5]. Popiół gromadzi się nad strefą żaru, a w miarę podsuwania kolejnych porcji paliwa przesypuje się przez krawędź dyski paleniska do popielnika.

Kocioł Q EKO 15 jest stalowym, niskotemperaturowym kotłem wodnym. Spalanie paliw odbywa się z wykorzystaniem podajnika, palnika retortowego oraz wentylatora nadmuchowego. Konstrukcja kotła składa się z dwóch części czynnych oddzielonych przegrodą wodną. W dolnej części korpusu znajdują się komora paleniskowa, w której zamontowany jest palnik retortowy, zaś w górnej części korpusu kotła znajduje się część grzewcza, w skład której wchodzi kolumna wodna, przegroda wodna, wewnętrzny płaszcz wodny i płomienica przechodząca w czopuch. W górnej części kotła znajdują się drzwi przeznaczone do czyszczenia kotła tzw. drzwiczki wyczystkowe. Kocioł mieści się w normach dotyczących emisji oraz sprawności odpowiadających klasie 3 [48]. Schemat kotła został przedstawiony na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Schemat kotła Heiztechnik Q EKO 15 [48]

- 1 - wentylator, 2 - podajnik, 3 - kondensator, 4 - silnik podajnika, 5 - zawleczka, 6 - motoreduktor, 7 - zbiornik paliwa, 8 - kłapa zbiornika, 9 - czujnik temperatury, 10 - kolumna, 11 - profil przegrody, 12 - deflektor, 13 - czujnik temp. podajnika, 14 - zaślepka podajnika, 15 - palnik retortowy, 16 - króciec spustowy, 17 - króciec powrotny, 18 - izolacja, 19 - szpilka, 20 - czopuch, 21 - króciec zasilający, 22 - drzwi wyczystkowe, 23 - drzwi wyczystkowe, 24 - drzwi popielnicowe

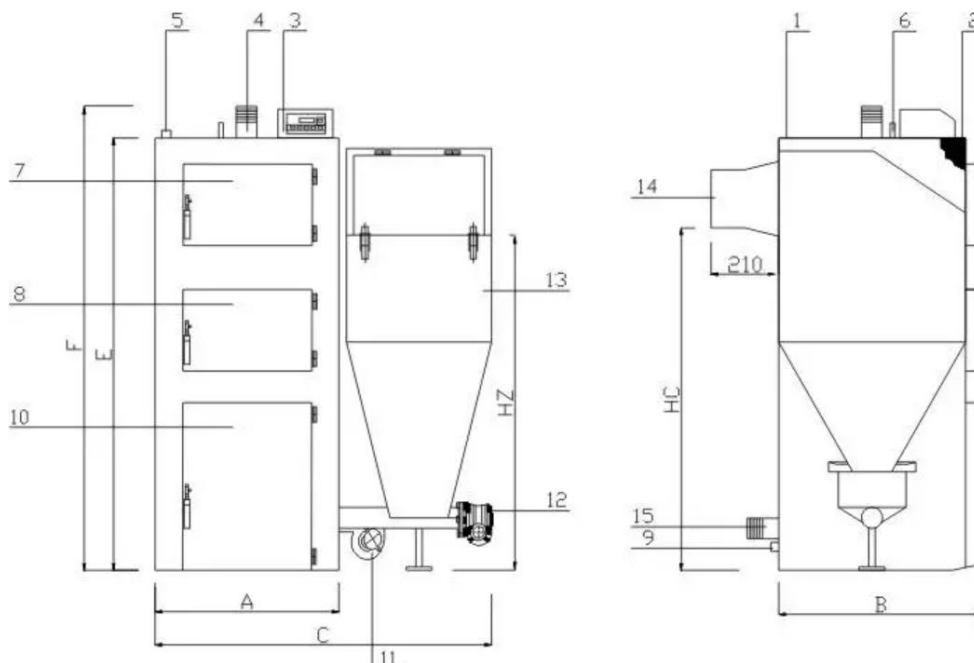
Kocioł współpracuje z podajnikiem paliwa typu PPSM firmy Pancerpol (rys. 4.7). Jest to palnik retortowy II generacji pozwalający na spalanie miazł węglowego. Charakterystycznym elementem konstrukcji tego typu palnika jest obrotowy talerz paleniska umożliwiający kruszenie spieków żuźlowych występujących podczas spalania paliw gorszej jakości o większej liczbie Rogi. Liczba Rogi przedstawiana jest za pomocą wskaźnika RI, który określa spiekalność węgla. Spiekalność węgla jest ważnym wskaźnikiem jakości surowca i informuje o tym, jak węgiel zachowa się podczas spalania: czy wystąpi spiekanie (sklejanie) węgla, czy w kotle zostanie sam popiół. Spieki powstają, kiedy węgiel topnieje, zamiast się spalić, w wyniku czego po zastygnięciu masy powstaje koks. Paliwem dla tego palnika jest eko-groszek o maksymalnym rozmiarze ziaren do 30 mm i wilgotności 10% oraz miazł węgla o maksymalnych rozmiarach 30 mm i zawartości ziaren poniżej 0,5 mm do 10% oraz wilgotności do 10% [48].



Rys. 4.7. Podajnika paliwa stałego typu PPSM z możliwością spalania miazł [102]

Kocioł Tilgner EKR 20 jest kotłem sterowanym elektronicznie z retortowym podajnikiem ślimakowym opalany eko-groszkiem. Paliwo spala się w palniku z automatycznie sterowanym załadunkiem paliwa oraz regulowaną ilością powietrza wprowadzanego do komory spalania. W kotle zastosowano dwusystemowy sposób spalania polegający na zgazowaniu paliwa w pierwszym etapie, z jednoczesnym spalaniem produktów suchej destylacji w drugim etapie. Kocioł mieści się w normach

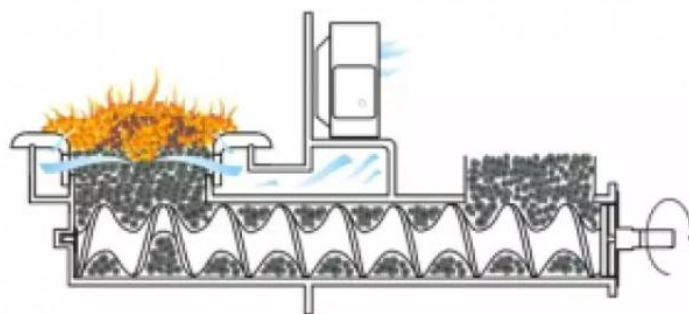
dotyczących emisji oraz sprawności odpowiadających klasie 3. Uzyskał świadectwo „znak bezpieczeństwa ekologicznego” wydane przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla [144]. Schemat kotła został przedstawiony na rysunku 4.8.



Rys 4.8. Schemat kotła Tilgner EKR 20 [144]

1 - korpus, 2 - izolacja termiczna, 3 - sterownik, 4 - króciec zasilający, 5 - mufka, 6 - czujnik, 7 - wyczystka górna, 8 - drzwiczki paleniskowe, 9 - mufka, 10 - popielnik, 11 - dmuchawa, 12 - zespół podający paliwo, 13 - zasobnik na paliwo, 14 - czopuch, 15 - króciec powrotny

Kocioł pracował z podajnikiem paliwa o nazwie handlowej BRUCER (rys. 4.9). Jest to palnik retortowy nowej generacji, wyprodukowany na podstawie licencji Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla, pozwalający na spalanie mialu węglowego oraz węgla spiekających. Podstawowa różnica konstrukcyjna w stosunku do konwencjonalnych palników retortowych polega na charakterystycznej modyfikacji podajnika ślimakowego z elementem odwrotnego zwoju w końcowej części ślimaka. W wyniku tego podawane paliwo nie jest dopychane przez ślimak do warstwy żaru, co powoduje niekorzystne silne zagęszczanie paliwa, ale jest wypiętrzane i mieszane z częścią żaru. Zalecane paliwo podane przez producenta kotła to eko-groszek energetyczny typu 31,2 o granulacji 5-25 mm, o niskim pęcznieniu, wilgotności do 15 %, zawartości mialu do 10 % i popiołu 4-8 % oraz temperatury spiekania się popiołu pow. 1150 °C. Zawartość części lotnych 28-40 % i spiekalność RI max 10 [68].



Rys. 4.9. Podajnik paliwa BRUCER z elementem odwrotnego zwoju w końcowej części ślimaka [68]

4.3. Analizatory spalin wykorzystane w badaniach

Stanowisko pomiarowe wyposażone zostało w dwa analizatory spalin. Pierwszy z nich to analizator jakości procesu spalania BCA-01 firmy Brager. Umożliwiał on pomiar zawartości tlenu w spalinach w sposób ciągły, zgodnie z koncepcją metody identyfikacji nieprawidłowej eksploatacji urządzeń grzewczych, a dokładniej kotłów małej mocy na paliwo stałe z podajnikiem automatycznym. Drugim wykorzystanym w badaniach analizatorem spalin był analizator spalin firmy Testo model 350-S. Za jego pomocą wykonywany był pomiar zawartości w spalinach tlenu węgla. Z powodu kołowego przekroju kanału wylotowego spalin, w przypadku obydwóch wytypowanych do badań kotłów, zamontowany został dodatkowy adapter umożliwiający precyzyjny montaż czujnika temperatury oraz analizatorów spalin [153].

Analizator Jakości Procesu Spalania BCA-01 (rys. 4.10) przeznaczony jest do pomiaru procesu spalania paliw stałych w kotłach małej i średniej mocy. Jego konstrukcja pozwala na ciągły pomiar w zapyłonych spalinach odlotowych wielu parametrów fizycznych i chemicznych informujących o jakości procesu spalania. Bazując na danych uzyskanych przy pomocy analizatora możliwe jest dokonanie dynamicznej korekty parametrów pracy kotła, zbliżając się tym samym do optymalnych parametrów pracy urządzenia grzewczego. Skutkować może to ograniczeniem emisji związków toksycznych do atmosfery, przez co polepszeniu ulegnie jakość powietrza [138].



Rys. 4.10. Analizator Jakości Procesu Spalania BCA-01 [18]

Analizator pozwala na pomiar:

- procentowego stężenia tlenu O_2 w spalinach (0 do 20,9 %),
- współczynnika nadmiaru powietrza λ ,
- procentowego stężenia dwutlenku węgla CO_2 ,
- temperatury spalin,
- temperatury powietrza doprowadzanego do kotła,
- straty kominowej.

Maksymalny błąd wskazania stężenia tlenu O_2 wynosi $\pm 0,5$ % wartości mierzonej [18].

Analizator spalin Testo 350-S (rys. 4.11) został wyposażony w dokładne cele elektrochemiczne oraz najnowsze rozwiązanie umożliwiające „rozcieńczanie” analizowanych gazów w celu zwiększenia zakresu pomiarowego celi CO do 25 000 ppm. Pozwala to jednocześnie na jej dodatkowe zabezpieczenie, wydłużenie jej trwałości oraz czasu wykonywania pomiarów. W tabeli 4.1 oraz 4.2 przedstawiono zakresy pomiarowe oraz dokładności cel pomiarowych.



Rys. 4.11. Analizator spalin Testo 350-S [143]

Tab. 4.1. Zakresy pomiarowe i dokładności analizatora spalin Testo 350-S [143]

Parametr	Zakres pomiarowy	Dokładność		Rozdzielczość	Czas reakcji
O ₂	0 ÷ 25 obj.%	±0,2 obj.%	(0 ÷ 25 obj.%)	0,01 obj.%	20 s
CO, H ₂ -komp.	0 ÷ 10000 ppm	±10 ppm ±5 % wartości ±10 % wartości	(0 ÷ 99 ppm) (100 ÷ 2000 ppm) (2001 ÷ 10000 ppm)	1 ppm	40 s
CO _{niskie} , H ₂ -komp.	0 ÷ 500 ppm	±2 ppm ±5 % wartości	(0,0 ÷ 39,9 ppm) (40,0 ÷ 500,0 ppm)	0,1 ppm	40 s
CO ₂ (IR)	0 ÷ 50 vol.%	±0,3 vol.%+1 % wartości ±0,5 vol.%+1,5 % wartości	(0,00 ÷ 25,00 vol.%) (25,1 ÷ 50,0 vol.%)	0,01 vol.% 0,1 vol.%	10 s
NO ₂	0 ÷ 500 ppm	±5 ppm ±5 % wartości	(0,0 ÷ 99,0 ppm) (100,0 ÷ 500,0 ppm)	0,1 ppm	40 s
SO ₂	0 ÷ 5000 ppm	±5 ppm ±5 % wartości ±10 % wartości	(0 ÷ 99 ppm) (100 ÷ 2,000 ppm) (2001 ÷ 5000 ppm)	1 ppm	30 s
NO _{niskie}	0 ÷ 300 ppm	±2 ppm ±5 % wartości	(0,0 ÷ 39,9 ppm) (40,0 ÷ 300,0 ppm)	0,1 ppm	30 s
NO	0 ÷ 3000 ppm	±5 ppm ±5 % wartości ±10 % wartości	(0 ÷ 99 ppm) (100 ÷ 1999 ppm) (2000 ÷ 3000 ppm)	1 ppm	30 s
H ₂ S	0 ÷ 300 ppm	±2 ppm ±5 % wartości	(0 ÷ 39,9 ppm) (40,0 ÷ 300 ppm)	0,1 ppm	35 s

Tab. 4.2. Zakresy pomiarowe i dokładności z włączoną funkcją „rozcieńczenie” analizatora spalin Testo 350-S [143]

Parametr	Zakres pomiarowy	Dokładność
CO, H ₂ -komp.	0 ÷ 400000 ppm	±2 % dodatkowego błędu odczytu
CO _{niskie} , H ₂ -komp.	0 ÷ 25000 ppm	±2 % dodatkowego błędu odczytu

W obu powyższych tabelach zestawiono zakresy pomiarowe oraz dokładność poszczególnych parametrów analizatora, również w przypadku wykonywania pomiarów z włączoną funkcją „rozcieńczenie” dla celi CO. W trakcie badań wykorzystywano cele O₂, CO_{niskie}, CO₂ do 25 %, NO do 3000 ppm, SO₂ do 5000 ppm, H₂S do 300 ppm. W rozprawie przedstawione zostaną wybrane wartości spośród wszystkich rejestrowanych, odpowiednie do oceny prawdziwości tezy badawczej.

5. Metodologia badań

Przeprowadzone badania mające na celu opracowanie procedury umożliwiającej wykrycie spalania odpadów komunalnych, na podstawie analizy zawartości tlenu w emitowanych spalinach przez kotły małej mocy z automatycznym załadunkiem paliwa, zostały podzielone na dwa etapy.

W etapie pierwszym wytypowane do badań kotły zostały przebadane przy wykorzystaniu zalecanego przez producenta paliwa w postaci eko-groszku. Celem badań było uzyskanie punktów odniesienia w postaci granicznych wartości badanych parametrów podczas prawidłowej eksploatacji kotłów. Podczas przeprowadzonych badań wykonywane zostały pomiary zmian następujących parametrów:

- temperatury wody wylotowej (wypływającej) z kotła T_1 [°C],
- temperatury wody powrotnej (dopływającej) do kotła T_2 [°C],
- temperatury wody na wejściu do wymiennika ciepła schładzającego wodę obiegową kotła T_3 [°C],
- temperatury wody na wyjściu z wymiennika ciepła schładzającego wodę obiegową kotła T_4 [°C],
- temperatury spalin T_{spal} [°C],
- zawartości tlenku węgla w spalinach CO [ppm],
- zawartości tlenu w spalinach O_2 [%].

W drugim etapie badań przeprowadzony został eksperyment symulujący niewłaściwą eksploatację kotłów w warunkach rzeczywistych poprzez współspalanie wytypowanych odpadów komunalnych jako składnika w paliwie. W tym celu wybrano sześć partii selekcyonowanych odpadów komunalnych o określonej masie. W tabeli 5.1 przedstawiono klasyfikację oraz masę wykorzystanych odpadów. Dodatkowo partie od 3 do 6 wyselekcjonowanych odpadów komunalnych składających się z mieszaniny tworzyw sztucznych, tekstyliów, makulatury oraz elementów metalowych zostały przebadane i poddane analizie technicznej zgodnie z normami dotyczącymi paliw stałych. Zadaniem tego etapu było wykonanie pomiarów, analiza oraz porównanie otrzymanych wyników z wartościami otrzymanymi w pierwszym etapie.

Tab. 5.1. Klasyfikacja przygotowanych partii odpadów

Nr partii	Materiał	Rodzaj odpadu	Masa [g]
1	Tworzywa sztuczne	Butelka plastikowa	65
2	Tekstylia	Obuwie	375
3	Odpad komunalny	Mieszanina odpadów	300
4	Odpad komunalny	Mieszanina odpadów	600
5	Odpad komunalny	Mieszanina odpadów	300
6	Odpad komunalny	Mieszanina odpadów	600

Etap pierwszy badań

W pierwszym etapie procedura przeprowadzanych badań w przypadku obydwóch kotłów była taka sama. Badania zostały przeprowadzone podczas pracy kotłów na poziomie 33 %, 66 % oraz 100 % mocy znamionowej. W przypadku kotła Heiztechnik Q EKO 15 były to moce 5 kW, 10 kW oraz 15 kW, a w przypadku kotła Tilgner EKR 20 kolejno 7 kW, 13 kW oraz 20 kW. Moce, z jaką pracowały kotły, uzyskiwane były w wyniku zmiany strumienia masy wody na wlocie do kotła przy wykorzystaniu zaworu dławiącego. Praca kotłów, podajników paliwa oraz wentylatorów sterowana była elektronicznie za pomocą sterownika działającego na podstawie algorytmu PID, który pracował na podstawie zadanej temperatury wody na wyjściu z kotła wynoszącej 60 °C. Paliwem wykorzystanym w badaniach był zalecony przez producenta węgiel sortowany, tzw. eko-groszek, którego specyfikacja podana została przedstawiona w tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Specyfikacja eko-groszku wykorzystanego w badaniach

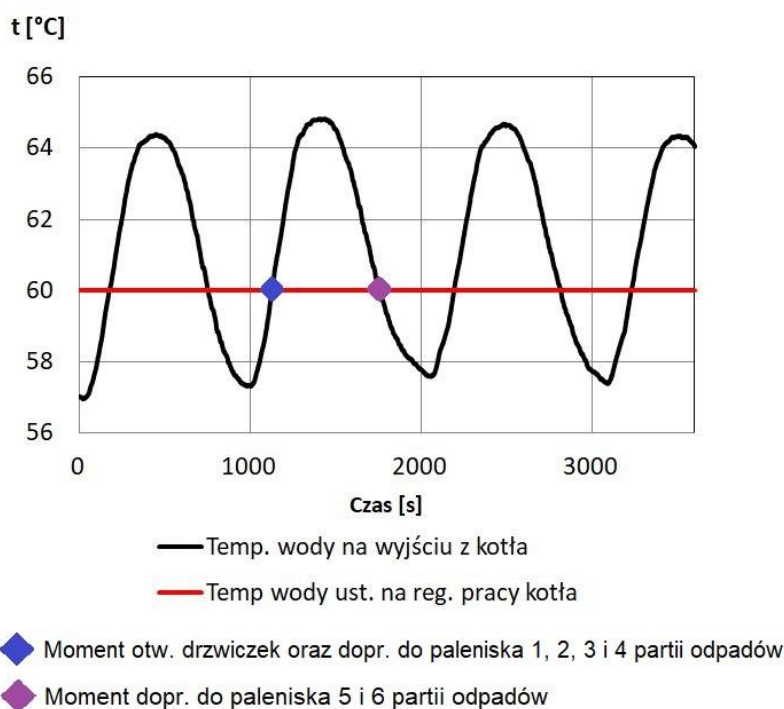
Wartość opałowa	21 ÷ 24 MJ/kg
Ciepło spalania	25 ÷ 30 MJ/kg
Granulacja	5 ÷ 25 mm
Wilgotność	7 ÷ 18 %
Popiół	7 ÷ 10 %
Siarka całkowita	0,5 ÷ 1,0 %
Podziarno	1 ÷ 10 %
Nadziarno	1 ÷ 10 %
Zdolność do spiekania	0 ÷ 20 %

Badania kotłów przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 303-5 [109]. Procedura przeprowadzenia badań w pierwszym etapie obejmuje:

- ręczne rozpalenie kotła,
- praca kotła po przestawieniu sterownika w tryb automatyczny do momentu osiągnięcia zadanej temperatury wody na wyjściu z kotła w wysokości 60 °C,
- ustawienie mocy kotła za pomocą regulacji strumienia masy wody przy wykorzystaniu zaworu na wlocie wody do kotła,
- czterogodzinny okres stabilizacji pracy kotła,
- wykonanie pomiarów określonych parametrów, czas pomiarów wynosił 1 godz.,
- wygaszenie kotła.

Etap drugi badań

W drugim etapie badań przeprowadzono eksperyment symulujący nieprawidłową eksploatację kotłów w warunkach rzeczywistych. W tym celu w kotle Heiztechnik Q EKO 15 wykonano niezgodne z zaleceniami producenta, jednak powszechnie stosowane przez użytkowników, zmiany w konstrukcji kotła umożliwiające wykorzystanie odpadów jako paliwo. Zdemontowany został deflektor, co umożliwiło zamontowanie rusztu. Kocioł Tilgner EKR 20 był wyposażony w ruszt przez producenta. Dalsza procedura badań, podobnie jak w etapie pierwszym, była taka sama dla obydwóch kotłów. Badania przeprowadzono na poziomie 33 %, 66 % oraz 100 % mocy znamionowej kotłów. W przypadku kotła Heiztechnik EKO 15 były to moce 5 kW, 10, kW oraz 15 kW, a w przypadku kotła Tilgner EKR 20 kolejno 7 kW, 13 kW oraz 20 kW. Moce, z jaką pracowały kotły, uzyskiwane były poprzez zmianę strumienia masy wody na wlocie do kotła za pomocą zaworu. Podobnie jak w etapie pierwszym, w celu rozpalania, osiągnięcia zadanej mocy oraz stabilnej pracy kotła, wykorzystano paliwo zalecone przez producenta. Pierwszym krokiem było sprawdzenie reakcji badanych parametrów na samo otwarcie drzwiczek wyczystkowych kotła. Następnie przeprowadzono eksperymenty, podczas których do paleniska dokładano wcześniej przygotowane partie odpadów. Praca kotłów była również sterowana elektronicznie poprzez sterownik działający na podstawie algorytmu PID. Temperatura wody na wyjściu z kotła oscylowała wokół temperatury zadanej w wysokości 60 °C, w zależności od cyklu pracy kotła rosnąc lub spadając w granicach od 57 °C do 65 °C. W związku z tym eksperymenty przedstawiające reakcję badanych parametrów na otwarciu drzwiczek wyczystkowych oraz dorzucenie do paleniska partii odpadów od 1 do 4 wykonane zostały po osiągnięciu przez wodę na wylocie z kotła 60 °C w trakcie cyklu, w którym temperatura wody rosła. Z kolei eksperymenty przedstawiające reakcję na dorzucenie do paleniska 5 i 6 partii odpadów wykonane zostały po osiągnięciu przez wodę na wylocie 60 °C podczas cyklu, w którym temperatura wody spadała. Na rysunku 5.1 przedstawione zostały momenty rozpoczęcia eksperymentów w zależności od cyklu pracy kotła.



Rys. 5.1. Momenty rozpoczęcia poszczególnych eksperymentów w zależności od cyklu pracy kotła

Procedura przeprowadzenia eksperymentu przedstawiającego reakcję badanych parametrów na otwarciu drzwiczek wyczystkowych:

- ręczne rozpalenie kotła,
- praca kotła po przestawieniu sterownika w tryb automatyczny do momentu osiągnięcia zadanej temperatury wody na wyjściu z kotła w wysokości 60 °C,
- ustawienie mocy kotła za pomocą regulacji strumienia masy wody przy wykorzystaniu zaworu na wlocie wody do kotła,
- czterogodzinny okres stabilizacji pracy kotła,
- rozpoczęcie wykonywania pomiarów określonych parametrów po osiągnięciu temperatury wody na wyjściu z kotła w wysokości 60 °C (otwarcie drzwiczek wyczystkowych na czas 30 s w 50 s pomiaru) dalsza rejestracja parametrów do momentu ich powrotu do wartości przed rozpoczęciem próby,
- wygaszenie kotła.

Procedura przeprowadzenia eksperymentu przedstawiającego reakcję badanych parametrów na doprowadzeniu do paleniska wybranej partii odpadów:

- ręczne rozpalenie kotła,
- praca kotła po przestawieniu sterownika w tryb automatyczny do momentu osiągnięcia zadanej temperatury wody na wyjściu z kotła w wysokości 60 °C,
- ustawienie mocy kotła za pomocą regulacji strumienia masy wody przy wykorzystaniu zaworu na wlocie wody do kotła,
- około czterogodzinny okres stabilizacji pracy kotła,
- rozpoczęcie wykonywania pomiarów określonych parametrów po osiągnięciu temperatury wody na wyjściu z kotła w wysokości 60 °C (otwarcie drzwiczek wyczystkowych na czas 30 s w 50 s pomiarów, po otwarciu drzwiczek dorzucenie wybranej partii odpadów) dalsza rejestracja parametrów do momentu ich powrotu do wartości przed rozpoczęciem próby,
- wygaszenie kotła.

6. Wyniki badań

6.1. Analiza odpadu komunalnego

Zgodnie z założonym planem badawczym w doktoracie, w pierwszym etapie badań poddano analizie mieszaninę odpadu komunalnego, pobranego ze składowiska odpadów miejskich, który został dostarczony do analizy przez służby miejskie w ramach innego zlecenia realizowanego na potrzeby miasta przez Politechnikę Poznańską. W pierwszym etapie przeprowadzono wizualną ocenę stanu odpadu komunalnego, która wykazała, że dominują w nim głównie materiały włókniste o niewielkiej gęstości. Kolejnym krokiem było losowe pobranie próbek z dostarczonej partii o masie 5 kg z różnych miejsc w celu wyodrębnienia rodzajów substancji, z których składa się odpad. Podczas jego analizy potwierdzono jego różnorodny skład i zidentyfikowano cztery grupy składników w nim występujące:

- grupa nr 1 – tekstylia pochodzenia naturalnego oraz sztucznego,
- grupa nr 2 – elementy metalowe t.j. drobne fragmenty różnego pochodzenia,
- grupa nr 3 – elementy z tworzyw sztucznych t.j. opakowanie po produktach spożywczych, grube folie, butelki plastikowe, itp.,
- grupa nr 4 – drobne zanieczyszczenia trudne do zidentyfikowania (prawdopodobnie odpad z trzech powyższych grup o wielkości uniemożliwiającej identyfikację).

Tabela 6.1 zawiera informacje dotyczące masy oraz udziału procentowego składników mieszaniny. Analiza danych w tabeli wskazuje, że największą masę w odpadzie reprezentuje grupa nr 4, stanowiąca 48 % całkowitej masy odpadu komunalnego. Kolejną istotną częścią odpadu jest grupa nr 3, która odpowiada za 36 % udziału masowego. Grupa nr 2 zajmuje trzecie miejsce, stanowiąc 11 % odpadu. Najmniejszy udział reprezentuje grupa nr 1 i stanowi 5 % całej pobranej partii odpadu o masie 5 kg.

Tab. 6.1. Udział masowy oraz procentowy poszczególnych grup odpadu komunalnego

Grupa	Masa grupy [kg]	Udział procentowy [%]
1	0,228	5
2	0,556	11
3	1,845	36
4	2,447	48
SUMA	5,077	100

Dostarczony odpad komunalny został poddany analizie technicznej zgodnie z normami obowiązującymi dla paliw stałych. W celu wyznaczenia wartości wilgoci przemijającej pobranych zostało 12 próbek o masie 1 kg. Na rysunku 6.1 przedstawiono zdjęcie przykładowej próbki odpadu o masie 1 kg, na którym możemy zaobserwować jego charakterystyczną włóknistą postać.



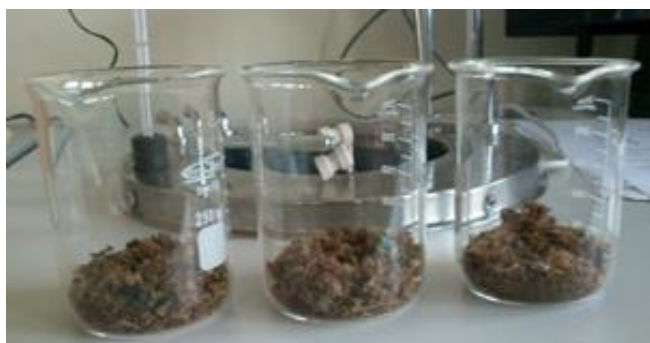
Rys. 6.1. Zdjęcie pobranej próbki mieszaniny odpadu komunalnego o masie 1 kg

W tabeli 6.2 przedstawiono zestawienie wyników badań wilgoci przemijającej. Wartość średnia otrzymana po przebadaniu 12 próbek wyniosła 37,16 %.

Tab. 6.2. Wyniki analizy wilgoci przemijającej badanej mieszaniny odpadów komunalnych

Nr próbki	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Wartość średnia:
Wilgoć przemijająca [%]	29,39	41,23	43,90	34,25	34,30	44,54	46,72	33,70	28,43	41,88	29,54	38,08	37,16

Następnie cała masa została zmielona w celu uzyskania jednorodnej substancji, z której wybrano 12 losowych próbek o masie 1 g, które poddano dalszym badaniom. Na rysunku 6.2 przedstawiono zdjęcie przykładowych trzech z dwunastu próbek. Możemy zaobserwować na nim jednorodną stałą postać mieszaniny odpadu. W tym etapie analizy technicznej odpadu komunalnego wyznaczone zostały wartości wilgoci analitycznej, części lotnych, popiołu oraz ciepła spalania. W tabeli 6.2 przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników.



Rys. 6.2. Próbkę mieszaniny odpadu komunalnego przygotowane do analizy technicznej

Tab. 6.3. Wyniki analizy technicznej badanej mieszaniny odpadów komunalnych

Nr próbki	Wilgoć analityczna [%]	Części lotne [%]	Zawartość popiołu [%]	Ciepło spalania [MJ/kg]
1	2,28	80,40	16,53	32,78
2	2,12	77,36	15,89	32,72
3	1,82	78,36	18,67	32,08
4	1,71	78,79	20,96	33,11
5	1,79	77,91	16,67	32,80
6	1,13	77,74	15,83	33,23
7	1,85	76,59	16,02	29,79
8	1,72	77,34	18,46	32,14
9	1,60	77,49	17,55	30,19
10	1,30	76,13	19,12	31,57
11	1,33	75,01	18,62	32,03
12	1,22	75,22	16,77	32,33
wartość średnia:	1,66	77,36	17,59	32,1 ± 1,1

Otrzymana w wyniku badań mieszaniny odpadu komunalnego średnia wartość wilgoci analitycznej wynosiła 1,66 %, a ciepła spalania 32,1 MJ/kg. Uzyskane wartości porównywalne są z parametrami wysokiej jakości węgla kamiennego. Z kolei zmierzone wartości części lotnych 77,36 % i popiołu 17,59 % znacznie je przekraczają. Oznacza to, że paliwo nie może być traktowane jako paliwo zastępcze, gdyż charakteryzuje się odmiennymi własnościami fizyko-chemicznymi, które determinują procesy spalania w kotłach i rzutują na skład emitowanych do atmosfery spalin.

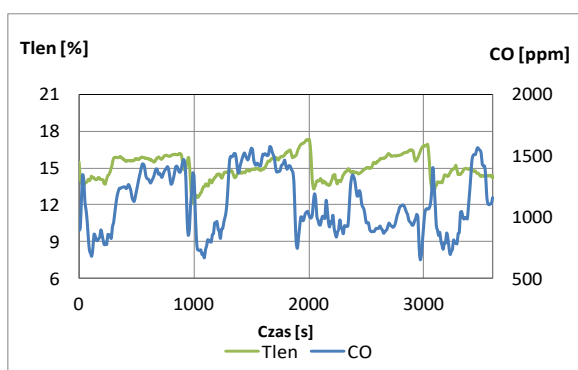
6.2. Analiza pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

W trakcie badań eksperymentalnych analizowano proces spalania paliwa podstawowego oraz jego współspalania z odpadami przy różnych mocach cieplnych kotła Heiztechnik Q EKO 15. Paliwo podstawowe oraz partie odpadów współspalane z paliwem podstawowym zostały opisane w rozdziale 5 w tabelach 5.1 oraz 5.2.

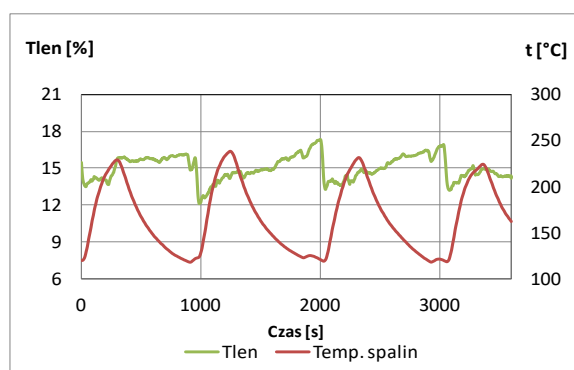
6.2.1. Praca kotła z mocą 5 kW

Wyniki badań podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta:

Na rysunkach 6.3 i 6.4 przedstawiono wykresy zestawiające pomiar temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta, na które zaprojektowano kocioł. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru po ustaleniu warunków pracy wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 5,34 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 11,59 ÷ 17,48 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 15,01 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 651 ÷ 1573 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 1116 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 118 °C, a 238 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 167 °C. Częstotliwość (okres) pracy w pojedynczym cyklu, uwzględniający pracę wentylatora i ślimakowego podajnika paliwa, oscylował w granicach 1000 s.



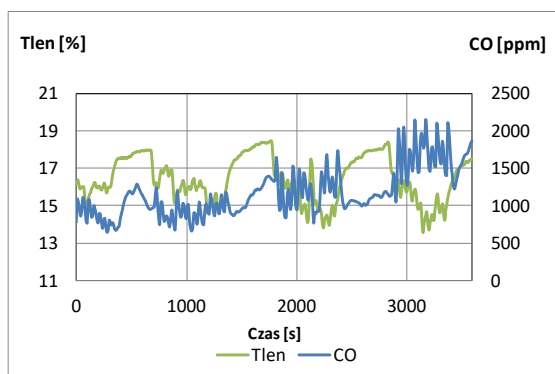
Rys. 6.3. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 5 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta



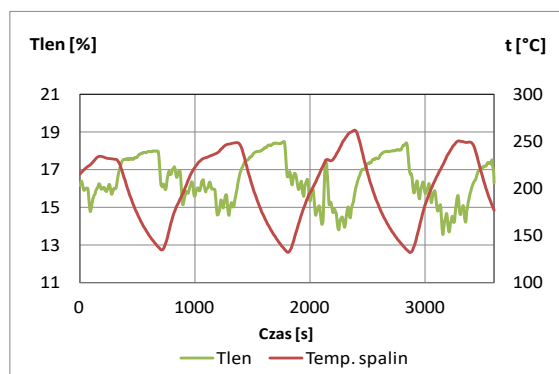
Rys. 6.4. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 5 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

Wyniki badań podczas pracy kotła w warunkach niewłaściwej eksploatacji kotła:

Na rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono wykresy zmian temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła ze zmienioną konstrukcją paleniska umożliwiającą współspalanie odpadów przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 5,34 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 12,68 ÷ 18,58 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 16,42 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 647 ÷ 2159 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 1172 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 132 °C a 262 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 201 °C.

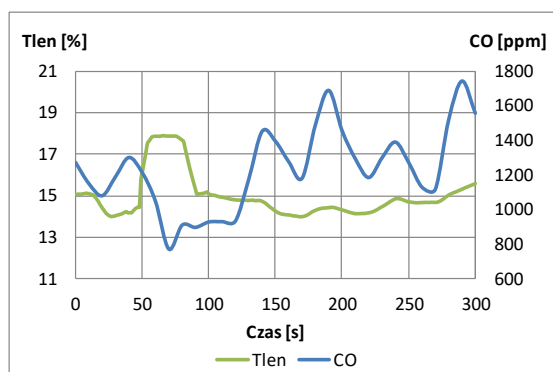


Rys. 6.5. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 5 kW z zamontowanym rusztem przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

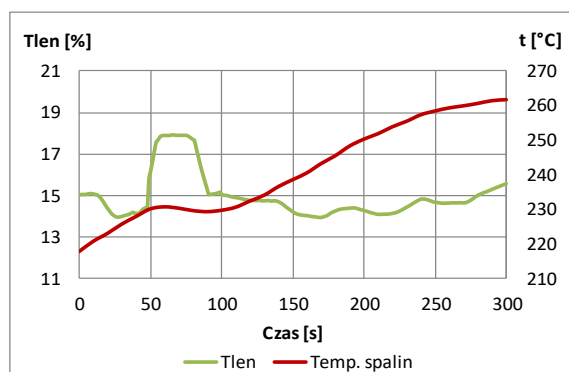


Rys. 6.6. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 5 kW z zamontowanym rusztem przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

Na rysunkach od 6.7 do 6.20 przedstawiono zmiany wartości temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła na poziomie 33 % mocy znamionowej (ok. 5 kW). Z powodu prezentacji wyników z dużą dokładnością na wykresach pokazano część cyklu pracy kotła po doprowadzeniu do jego paleniska odpadu. Długość pomiaru zależna była od czasu powrotu poziomu zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła i wahała się od 300 s do 900 s. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60 °C i oscylowała między 57 ÷ 63 °C. Pomiary zostały wykonane w momencie, kiedy temperatura wody na wyjściu z kotła wynosiła 60 °C. Na rysunkach 6.7 do 6.16 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym rosła temperatura spalin i wraz z nią temperatura wody na wyjściu z kotła. Z kolei wykresy przedstawione na rysunkach od 6.17 do 6.20 przedstawiają wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym malała temperatura spalin oraz temperatura wody na wyjściu z kotła. Na rysunkach 6.7 i 6.8 zaprezentowano przebieg zmian w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Heiztechnik Q EKO 15. Czas pomiaru wynosił 300 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,98 ÷ 15,18 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 1079 ÷ 1300 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 218 °C do 231 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 17,98 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 770 ppm oraz spadek temperatury spalin do 229 °C. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych zaobserwowano powrót wartości tlenu oraz tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 261 °C.



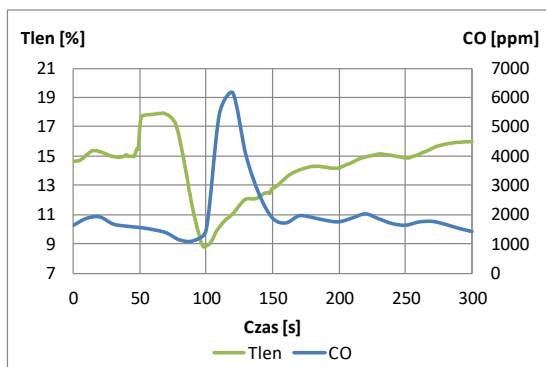
Rys. 6.7. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 5 kW



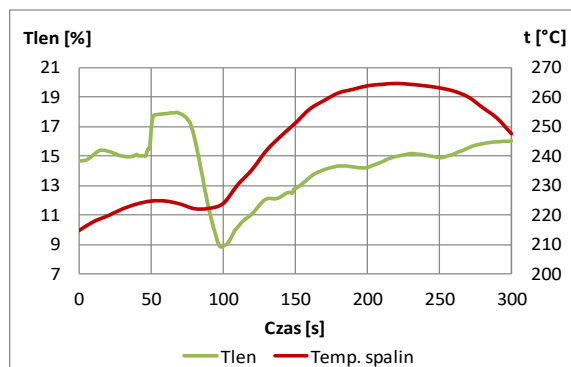
Rys. 6.8. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

Na rysunkach 6.9 i 6.10 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Czas pomiaru wynosił 300 s.

Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $14,48 \div 15,48 \%$, a poziom zawartości tlenu węgla oscylował między $1566 \div 1927$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $215 \text{ }^\circ\text{C}$ do $225 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $17,98 \%$, spadek wartości tlenu węgla do poziomu 1112 ppm oraz spadek temperatury spalin do $215 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych, gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $8,40 \%$, zawartość tlenu węgla wzrosła do 6154 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $265 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenu węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei wartość temperatury spalin zaczęła spadać i osiągnęła poziom $247,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

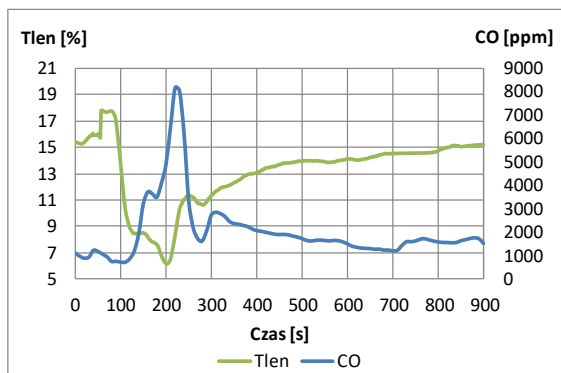


Rys. 6.9. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenu węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

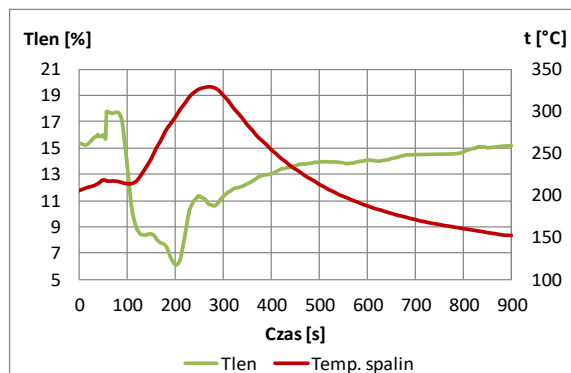


Rys. 6.10. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

Na rysunkach 6.11 i 6.12 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenu węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $15,17 \div 16,68 \%$, a poziom zawartości tlenu węgla oscylował między $908 \div 1242$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $205 \text{ }^\circ\text{C}$ do $218 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $18,18 \%$, spadek wartości tlenu węgla do poziomu 739 ppm oraz spadek temperatury spalin do $205 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $5,61 \%$, zawartość tlenu węgla wzrosła do 8167 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $329 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenu węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei wartość temperatury spalin zaczęła spadać i osiągnęła poziom $151,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

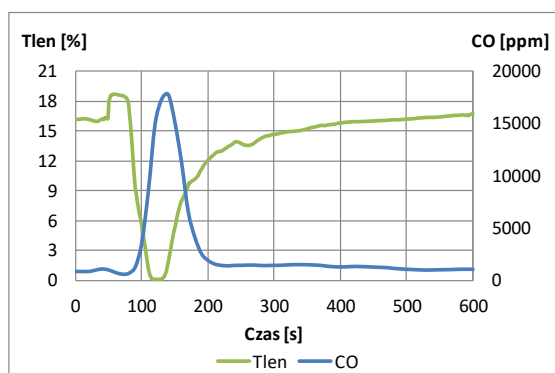


Rys. 6.11. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenu węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

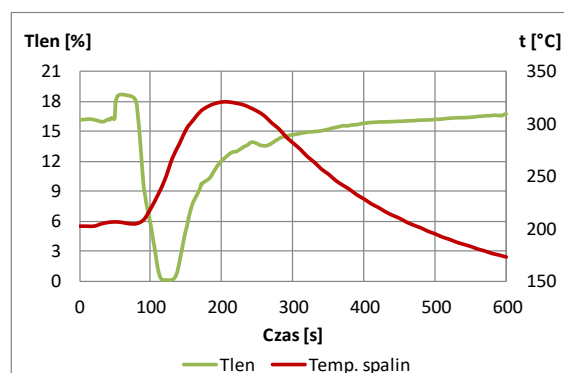


Rys. 6.12. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

Na rysunkach 6.13 i 6.14 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $15,98 \div 16,89 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $776 \div 1017$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $203 \text{ }^\circ\text{C}$ do $207 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $18,87 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 517 ppm oraz spadek temperatury spalin do $203 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,04 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 17733 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $321 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi.

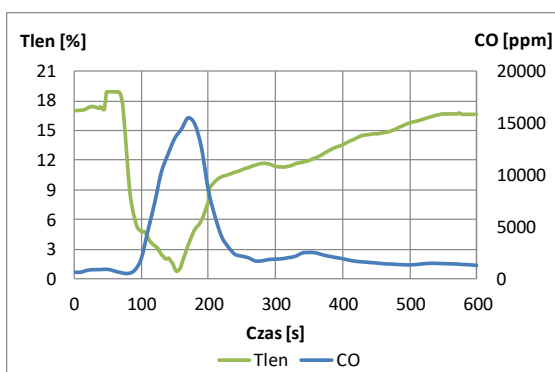


Rys. 6.13. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

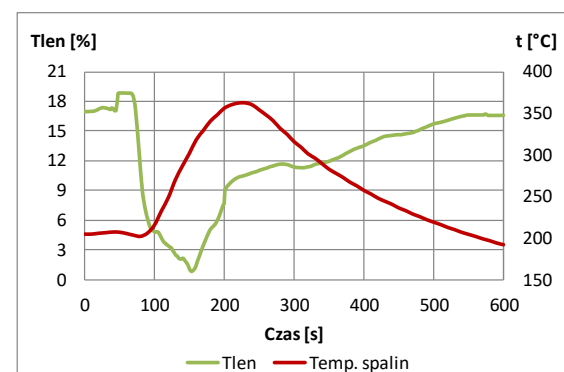


Rys. 06.14. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

Na rysunkach 6.15 i 6.16 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $16,98 \div 17,49 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $633 \div 912$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $204 \text{ }^\circ\text{C}$ do $207 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $18,98 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 507 ppm oraz spadek temperatury spalin do $202 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,31 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 15537 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $363 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi.

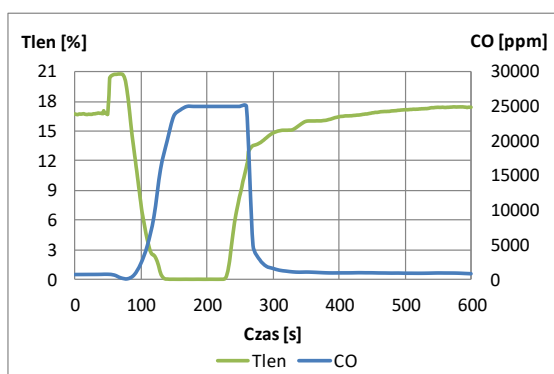


Rys. 6.15. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

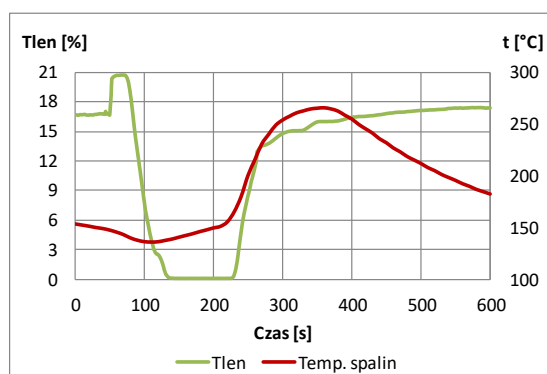


Rys. 6.16. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

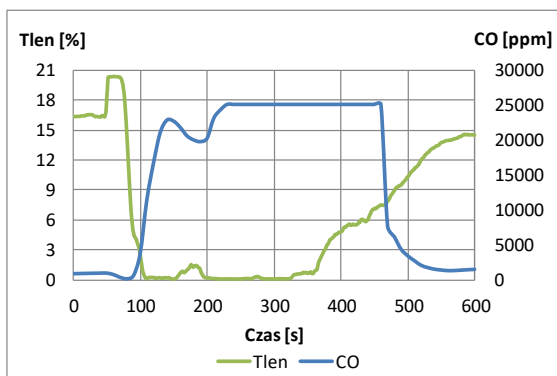
Na rysunkach 6.17 i 6.18 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $16,47 \div 16,89 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $785 \div 824$ ppm. Z kolei temperatura spalin malała od $155 \text{ }^\circ\text{C}$ do $145 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $20,79 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 171 ppm oraz gwałtowniejszy spadek temperatury spalin do $136 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03 \%$, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $266 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi.



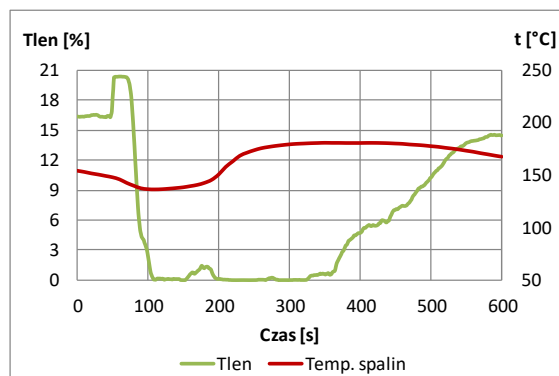
Rys. 6.17. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW



Rys. 6.18. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW



Rys. 6.19. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW



Rys. 6.20. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 5 kW

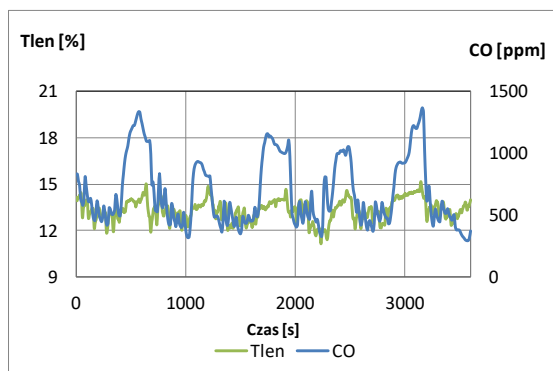
Na rysunkach 6.19 i 6.20 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $16,18 \div 16,68 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $849 \div 1052$ ppm. Z kolei temperatura spalin malała od $154 \text{ }^\circ\text{C}$ do $146 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $20,38 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 246 ppm oraz spadek temperatury spalin do $137 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03 \%$, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła

do 181 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi.

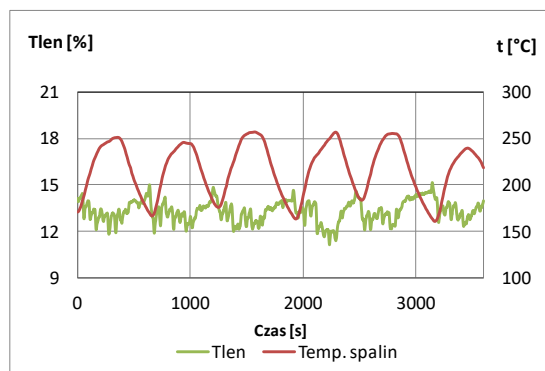
6.2.2. Praca kotła z mocą 10 kW

Wyniki badań podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta:

Na rysunkach 6.21 i 6.22 przedstawiono wykresy zestawiające pomiar temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta, na które zaprojektowano kocioł. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 10,58 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 10,99 ÷ 15,48 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 13,31 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 292 ÷ 1370 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 684 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 161 °C a 258 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 218 °C. Częstotliwość (okres) pracy w pojedynczym cyklu, uwzględniający pracę wentylatora i ślimakowego podajnika paliwa, oscylował w granicach 600 s.



Rys. 6.21. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 10 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta

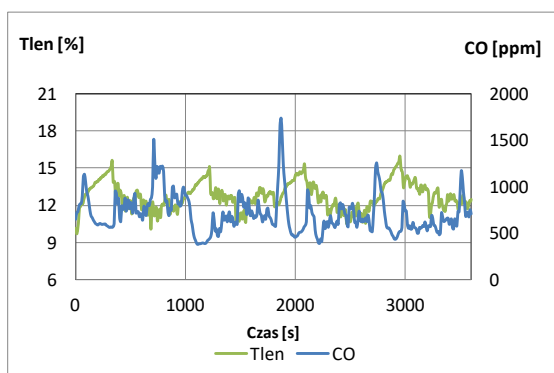


Rys. 6.22. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 10 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta

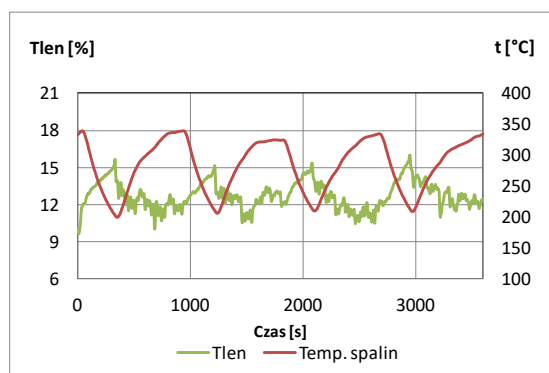
Wyniki badań podczas pracy kotła w warunkach niewłaściwej eksploatacji kotłów.

Na rysunkach 6.23 i 6.24 przedstawiono wykresy zmian temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła ze zmienioną konstrukcją umożliwiającą współspalanie odpadów przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 10,58 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 8,80 ÷ 16,38 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 12,76 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 381 ÷ 1734 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 706 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 200 °C a 339 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 283 °C. Na rysunkach od 6.25 do 6.38 przedstawiono zmiany wartości temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła na poziomie 66 % mocy znamionowej (ok. 10 kW). Z powodu prezentacji wyników z dużą dokładnością na wykresach pokazano część cyklu pracy kotła po doprowadzeniu do jego paleniska odpadu. Długość pomiaru zależna była od czasu powrotu poziomu zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła i wahała się od 300 s do 900 s. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60 °C i oscylowała między 57 ÷ 63 °C. Pomiarzy zostały wykonane w momencie, kiedy temperatura wody na wyjściu z kotła wynosiła 60 °C. Na rysunkach 6.25 do 6.34 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym rosła

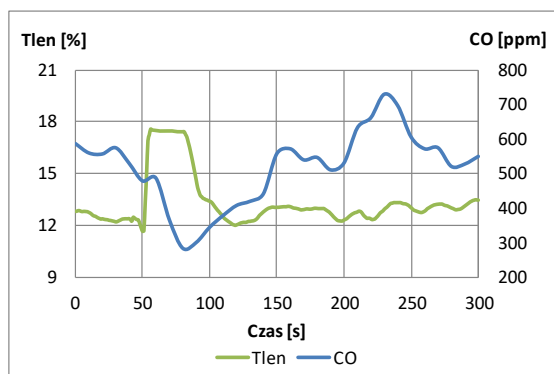
temperatura spalin i wraz z nią temperatura wody na wyjściu z kotła. Z kolei wykresy przedstawione na rysunkach od 6.35 do 6.38 przedstawiają wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym malała temperatura spalin oraz temperatura wody na wyjściu z kotła. Na rysunkach 6.25 i 6.26 zaprezentowano przebiegi zmian w czasie temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Heiztechnik Q EKO 15. Czas pomiaru wyniósł 300 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 11,59 ÷ 12,90 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 479 ÷ 587 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 295 °C do 327 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 17,59 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 284 ppm oraz spadek temperatury spalin do 288 °C. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych zaobserwowano powrót wartość tlenu oraz tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 317 °C.



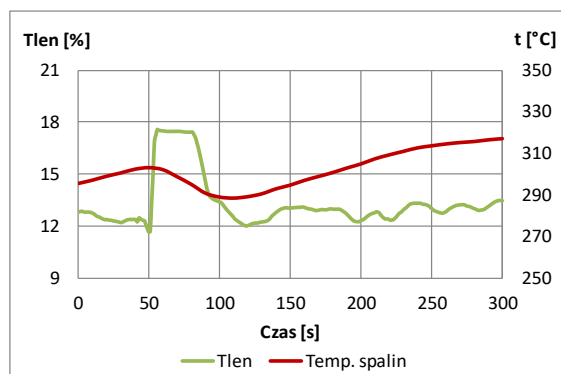
Rys. 6.23. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 10 kW z zamontowanym rusztem przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta



Rys. 6.24. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 10 kW z zamontowanym rusztem przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

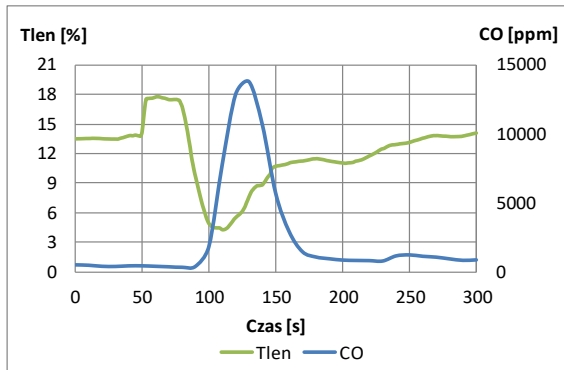


Rys. 6.25. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

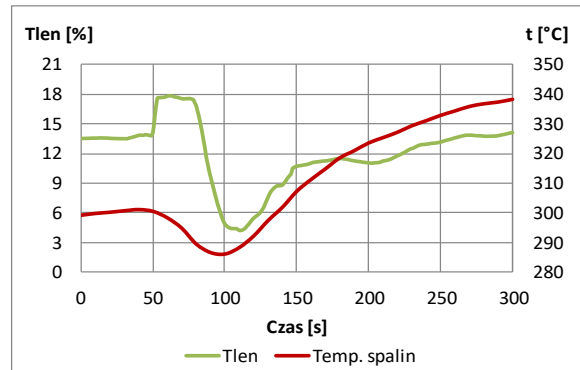


Rys. 6.26. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

Na rysunkach 6.27 oraz 6.28 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Czas pomiaru wyniósł 300 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,48 ÷ 14,48 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 376 ÷ 493 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 298 °C do 339 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 17,89 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 316 ppm oraz spadek temperatury spalin do 286 °C. Po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 3,92 %, zawartość tlenku węgla wzrosła do 13805 ppm. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin wzrosła do 338 °C.

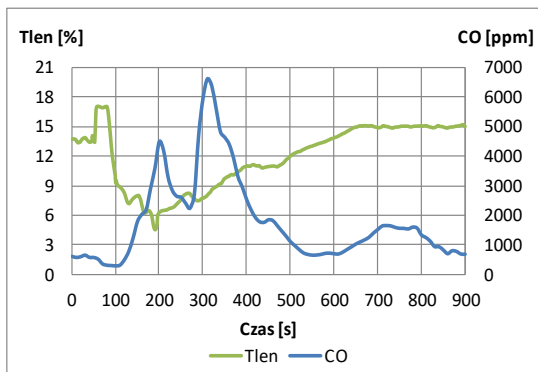


Rys. 6.27. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

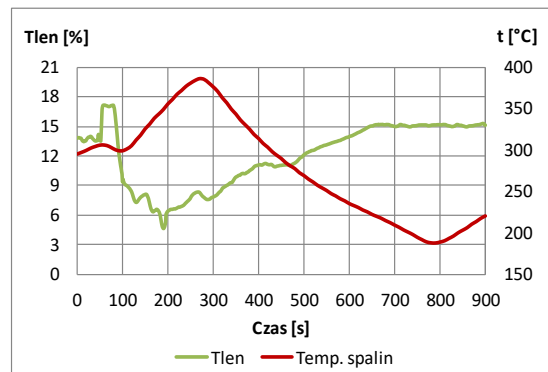


Rys. 6.28. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

Na rysunkach 6.29 i 6.30 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $13,07 \div 13,98 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $594 \div 673$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 295 °C do 306 °C . Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $17,28 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 312 ppm oraz spadek temperatury spalin do 299 °C . Po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych, gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $3,61 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 4507 ppm, następnie spadła do poziomu 2255 ppm, po czym wzrosła do 6623 ppm. Z kolei temperatura spalin wzrosła do 387 °C . Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Natomiast temperatura spalin spadła do $187,4 \text{ °C}$, a następnie zaczęła rosnąć i osiągnęła wartość $220,2 \text{ °C}$.



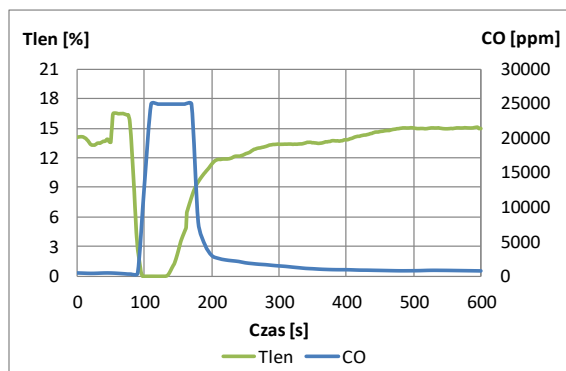
Rys. 6.29. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



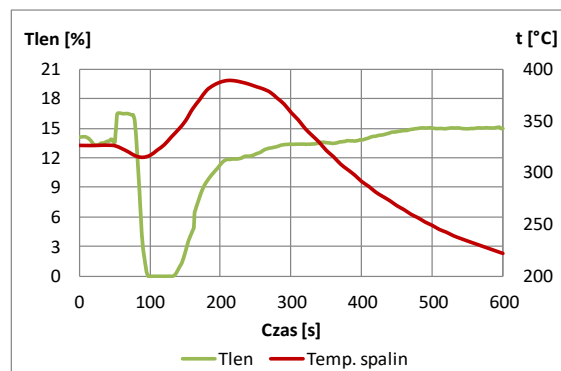
Rys. 6.30. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

Na rysunkach 6.31 i 6.32 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $12,47 \div 13,78 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $330 \div 392$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 323 °C do 326 °C . Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $16,68 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 223 ppm oraz spadek temperatury spalin do 315 °C . Po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,04 \%$, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 389 °C . Wraz

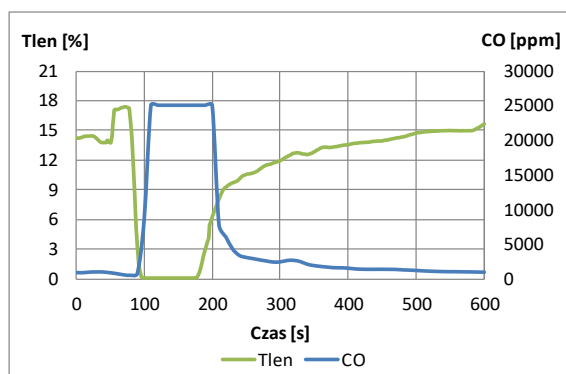
z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 222 °C.



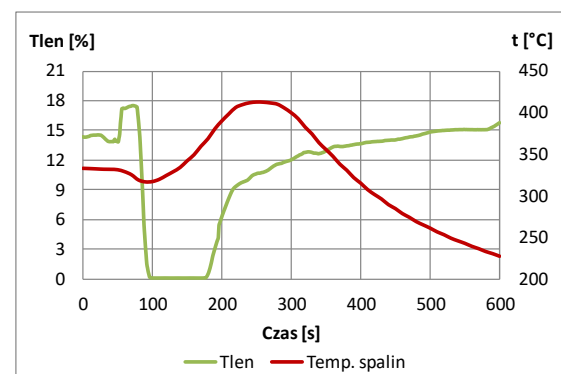
Rys. 6.31. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



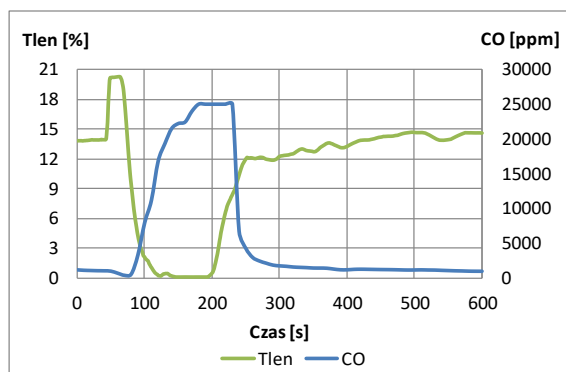
Rys. 6.32. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



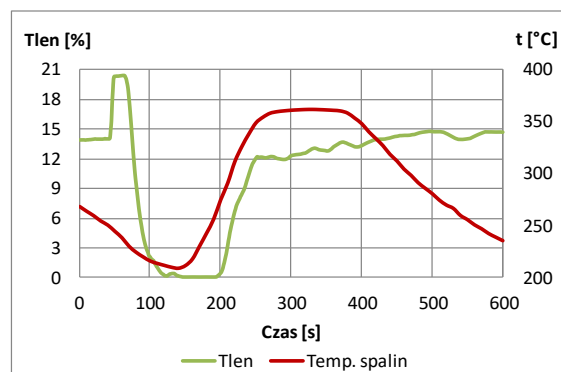
Rys. 6.33. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



Rys. 6.34. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



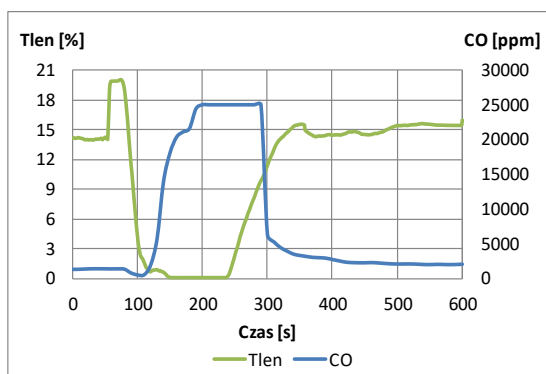
Rys. 6.35. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



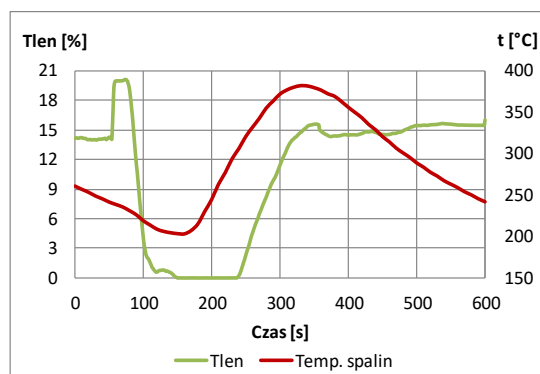
Rys. 6.36. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

Na rysunkach 6.33 oraz 6.34 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu w postaci mieszanki odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $16,98 \div 17,49 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $832 \div 951 \text{ ppm}$. Z kolei temperatura spalin rosła od 329 °C do 331 °C . Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $17,48 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 473 ppm oraz spadek temperatury spalin do 316 °C . Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi

wyczystkowych, gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 413 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 227 °C. Na rysunkach 6.35 i 6.36 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,69 ÷ 16,47 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 864 ÷ 1054 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 268 °C do 244 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 20,48 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 265 ppm oraz dalszy spadek temperatury spalin do 209 °C. Po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,04 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 362 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Na rysunkach 6.37 i 6.38 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,78 ÷ 14,38 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 1209 ÷ 1300 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 261 °C do 242 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 20,38 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 407 ppm oraz spadek temperatury spalin do 204 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,04 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 382 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi.



Rys. 6.37. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW



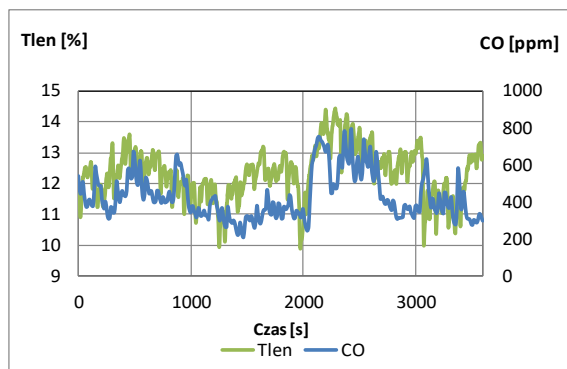
Rys. 6.38. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 10 kW

6.2.3. Praca kotła z mocą znamionową 15 kW

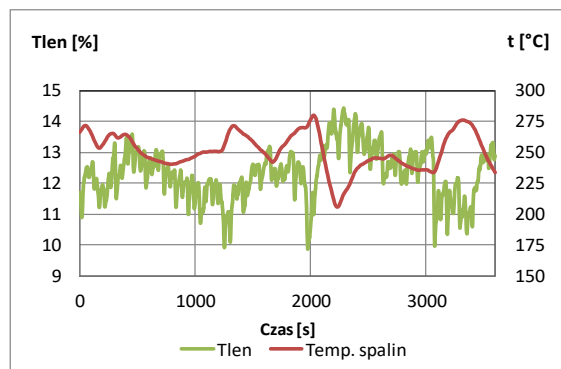
Wyniki badań podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta.

Na rysunkach 6.39 i 6.40 przedstawiono wykresy zestawiające pomiar temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez

producenta, na które zaprojektowano kocioł. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 15,59 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 9,40 ÷ 14,78 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 12,32 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 209 ÷ 795 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 429 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 206 °C a 280 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 251 °C.



Rys. 6.39. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 15 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

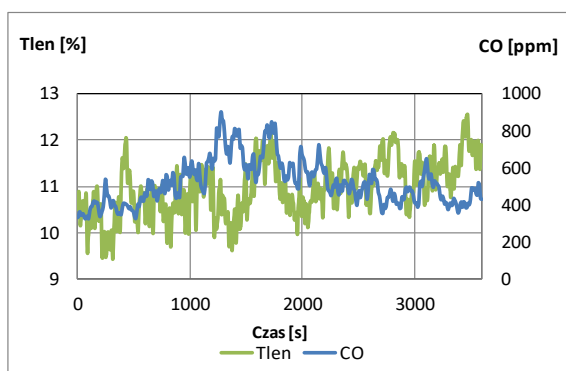


Rys. 6.40. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 15 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta

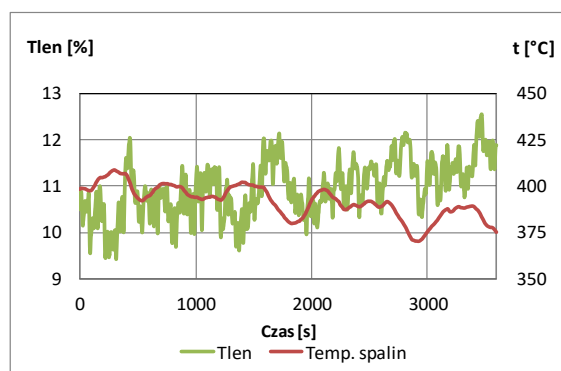
Wyniki badań podczas pracy kotła w warunkach niewłaściwej eksploatacji kotłów.

Na rysunkach 6.41 oraz 6.42 przedstawiono wykresy zmian temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła ze zmienioną konstrukcją umożliwiającą współspalanie odpadów przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 15,59 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 9,18 ÷ 12,68 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 10,97 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 321 ÷ 901 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 516 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 370 °C a 409 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 392 °C. Na rysunkach od 6.43 do 6.56 przedstawiono zmiany wartości temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła na poziomie 100 % mocy znamionowej (ok. 15 kW). Z powodu prezentacji wyników z dużą dokładnością na wykresach pokazano część cyklu pracy kotła po doprowadzeniu do paleniska odpadu. Długość pomiaru zależna była od czasu powrotu poziomu zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła i wahała się od 300 s do 900 s. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60 °C i oscylowała między 57 ÷ 63 °C. Pomiary zostały wykonane w momencie, kiedy temperatura wody na wyjściu z kotła wynosiła 60 °C. Na rysunkach od 6.43 do 6.52 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym rosła temperatura spalin i wraz z nią temperatura wody na wyjściu z kotła. Z kolei wykresy przedstawione na rysunkach od 6.53 do 6.56 przedstawiają wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym malała temperatura spalin oraz temperatura wody na wyjściu z kotła. Na rysunkach 6.43 oraz 6.44 zaprezentowano przebiegi zmian w czasie temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Heiztechnik Q EKO 15. Czas pomiaru wynosił 300 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 9,31 ÷ 10,51 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 521 ÷ 652 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 392 °C do 402 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 16,98 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 204 ppm oraz spadek temperatury spalin do 379 °C. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Na rysunkach 6.45 i 6.46 zaprezentowano wykresy przedstawiające

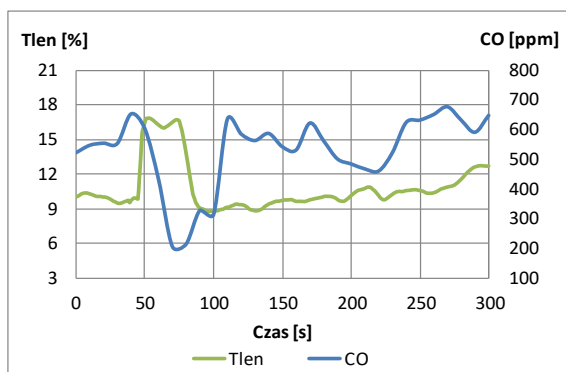
zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Czas pomiaru wynosił 300 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $9,18 \div 13,78 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $815 \div 1133$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $400 \text{ }^\circ\text{C}$ do $422 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $15,99 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 817 ppm oraz spadek temperatury spalin do $381 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $3,11 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 11216 ppm. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin utrzymywała się na poziomie ok. $410 \text{ }^\circ\text{C}$.



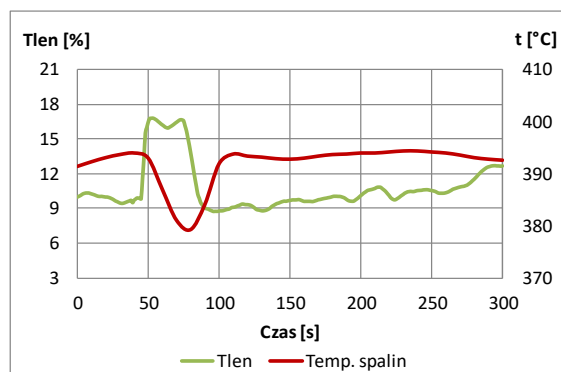
Rys. 6.41. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 15 kW z zamontowanym rusztem przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta



Rys. 6.42. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 15 kW z zamontowanym rusztem przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta



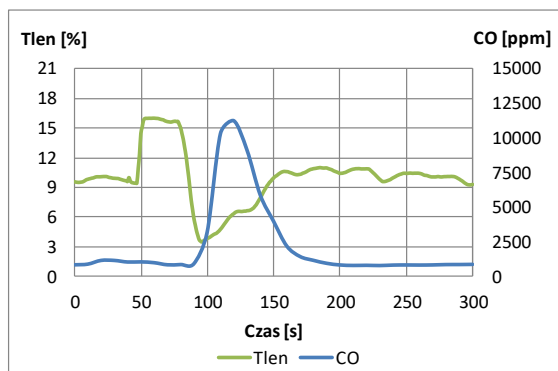
Rys. 6.43. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



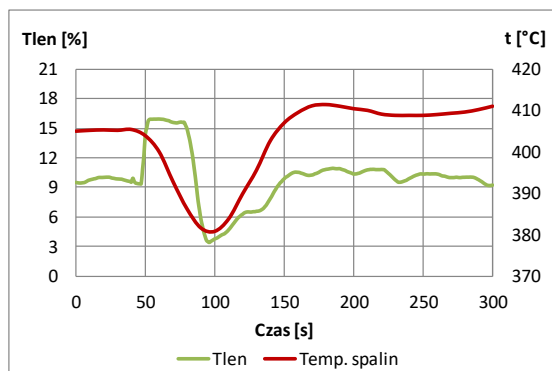
Rys. 6.44. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 15 kW

Na rysunkach 6.47 i 6.48 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $9,50 \div 11,48 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $750 \div 910$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $401 \text{ }^\circ\text{C}$ do $405 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $15,18 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 510 ppm oraz spadek temperatury spalin do $383 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych, gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $3,32 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 11627 ppm, następnie spadła na czas ok. 110 s do poziomu ok. 7500 ppm, po czym wzrosła do 12729 ppm. Z kolei temperatura spalin wzrosła do $460 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed

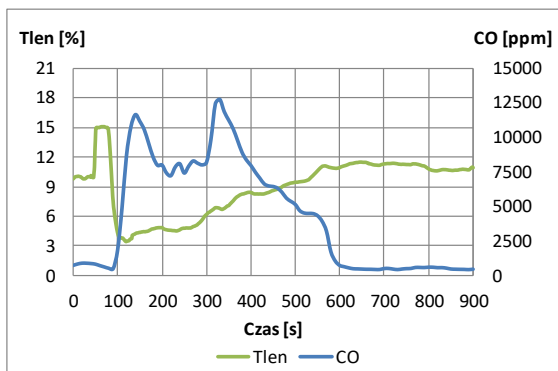
otwarcie drzwi. Z kolei temperatura spalin spadła do 290 °C, a następnie zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 364 °C.



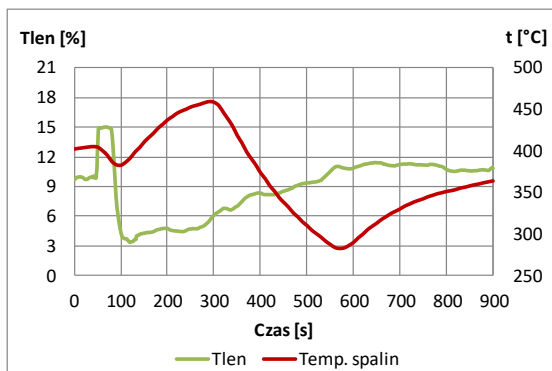
Rys. 6.45. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



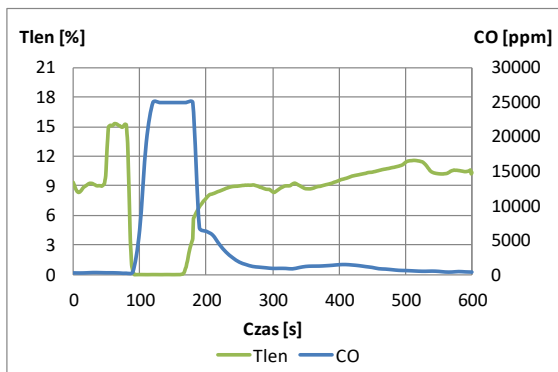
Rys. 6.46. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



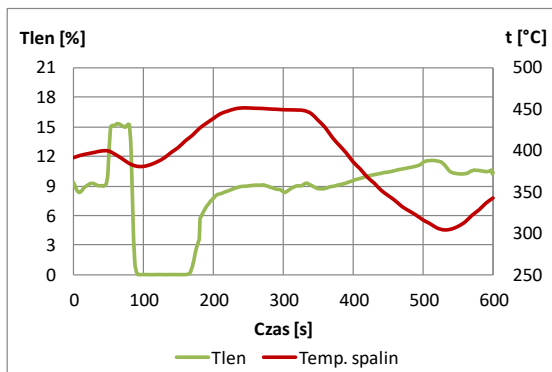
Rys. 6.47. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



Rys. 6.48. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



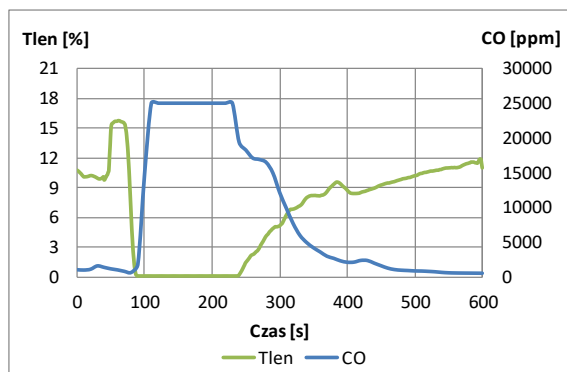
Rys. 6.49. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



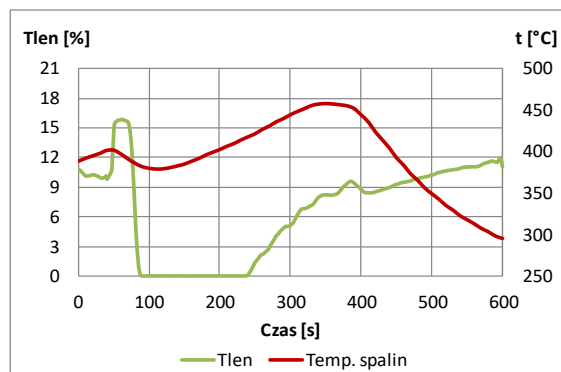
Rys. 6.50. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW

Na rysunkach 6.51 i 6.52 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 9,60 ÷ 10,99 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 908 ÷ 1506 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 389 °C do 402 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 15,99 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 556 ppm oraz spadek temperatury spalin

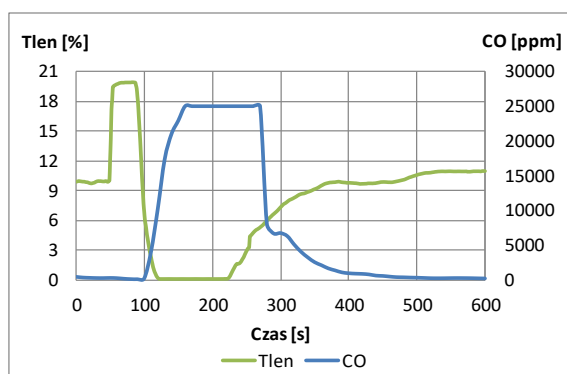
do 379 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 458 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 295 °C.



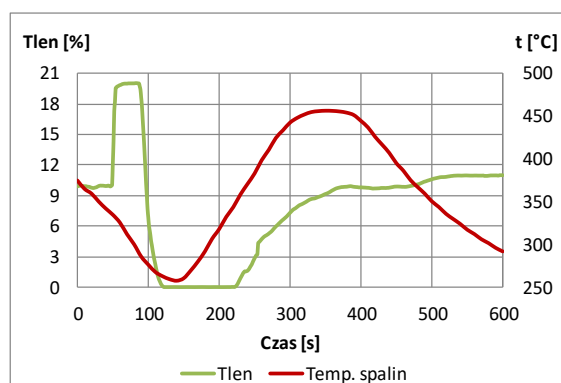
Rys. 6.51. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



Rys. 6.52. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła



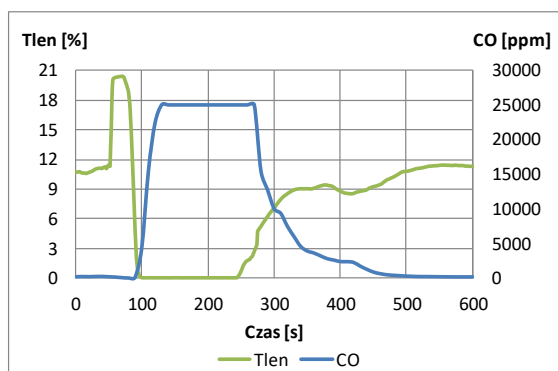
Rys. 6.53. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



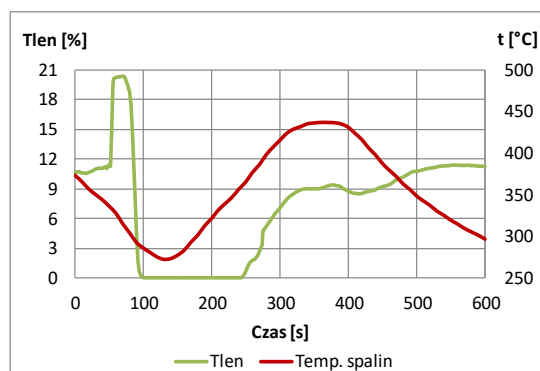
Rys. 6.54. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW

Na 6.53 i 6.54 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 9,60 ÷ 10,09 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 240 ÷ 417 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 375 °C do 335 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 20,08 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 76 ppm oraz dalszy spadek temperatury spalin do 257 °C. Po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,04 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 456 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Na rysunkach 6.55 i 6.56 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 10,40 ÷ 11,49 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 260 ÷ 309 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 3731 °C do 336 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost

wartości tlenu do poziomu 20,38 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 88 ppm oraz spadek temperatury spalin do 272 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,04 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 437 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi.



Rys. 6.55. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW



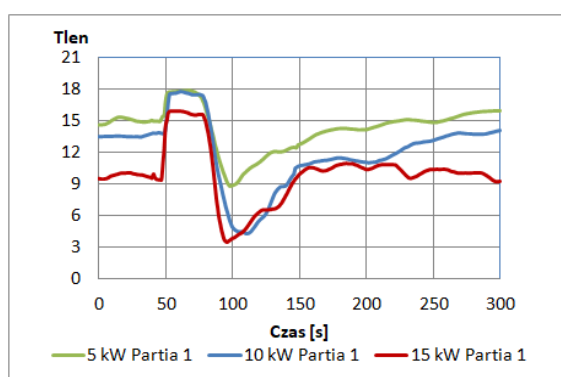
Rys. 6.56. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 15 kW

6.2.4. Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy z mocą 5, 10 i 15 kW

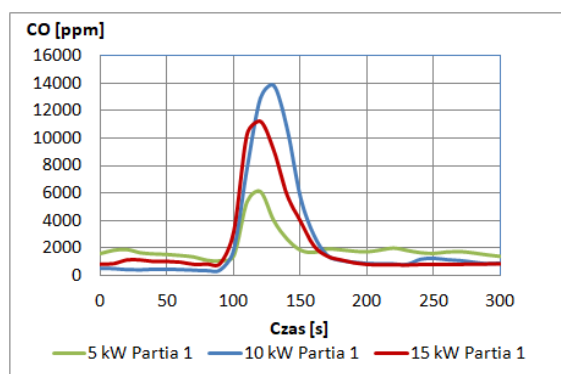
Na rysunkach od 6.57 do 6.74 zaprezentowano zestawienie wyników badań podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy: 5, 10 oraz 15 kW. Wykresy przedstawiają różnicę poziomów wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla w zależności od mocy, z jaką kocioł pracował na skutek doprowadzenia do paleniska kotła wcześniej przygotowanych sześciu partii odpadów. W tablicach od 6.57 do 6.62 przedstawiono zmianę wartości temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podzieloną na cztery charakterystyczne okresy. Pierwszy okres przedstawia poziom tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin podczas pracy kotła przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych. Podczas tego okresu wartości tlenu oraz tlenku węgla oscylowały na poziomach referencyjnych dla pracy kotła z danym obciążeniem. Z kolei temperatura spalin rosła albo spadała w zależności od cyklu pracy kotła. Drugi okres przedstawia zmianę mierzonych wartości w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w celu doprowadzenia odpadu. Okres ten rozpoczyna się w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru i charakteryzuje się nagłym wzrostem wartości tlenu. Poziom ten utrzymuje się na czas otwarcia drzwiczek wyczystkowych przez okres 30 s. Okres ten charakteryzuje się również spadkiem poziomu zawartości tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury. Następuje to w wyniku wychłodzenia komory spalania z powodu otwartych drzwiczek. Trzeci okres rozpoczyna się w osiemdziesiątej sekundzie pomiaru po doprowadzeniu do paleniska wcześniej przygotowanej wyselekcjonowanej partii odpadu oraz zamknięciu drzwiczek kotła. Okres ten charakteryzuje się gwałtownym spadkiem zawartości tlenu w spalinach w wyniku dostarczonego paliwa w postaci odpadu, z powodu którego następuje również wysoka emisja tlenku węgla oraz wzrost temperatury spalin. Wysokość emisji tlenku węgla oraz czas utrzymywania się wartości tlenu na niższym poziomie zależny był od masy doprowadzonych odpadów oraz mocy, z jaką pracował kocioł. Czwarty okres przedstawia powrót mierzonych wartości do poziomu przed otwarciem drzwi. Następuje to w wyniku wypalania się dostarczonego do paleniska odpadu. Z kolei końcowa wartość temperatury spalin zależna jest od aktualnej zmiany cyklu pracy kotła.

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów.

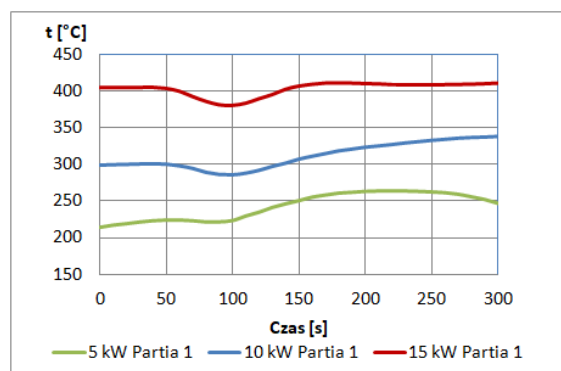
Na rysunku 6.57 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 9,39 %, dla 66 % mocy ok. 13,98 % i dla 33 % mocy ok. 14,98 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 6,61 % do poziomu 15,99 % dla 15 kW, o 4,00 % do poziomu 17,89 % dla 10 kW oraz o 3,01 % do poziomu 17,98 % dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem pierwszej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny spadek wartości tlenu o 12,88 % do poziomu 3,11 % podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, o 13,97 % do wartości 3,92 % przy mocy wynoszącej 10 kW oraz o 9,58 % do poziomu 8,40 % w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 9,18 %, dla 10 kW wyniosła 13,59 % oraz dla poziomu 5 kW mocy 15,88 %.



Rys. 6.57. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.58. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.59. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

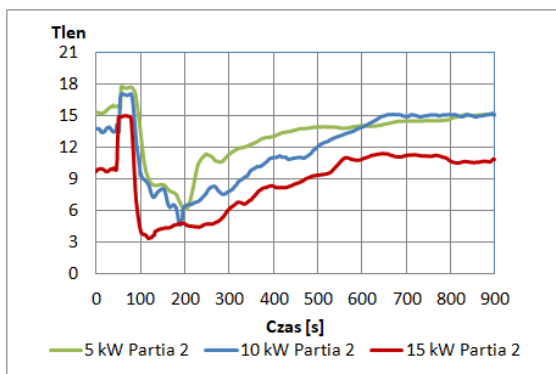
Na rysunku 6.58 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenu węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenu węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 998 ppm, dla 66 % mocy ok. 427 ppm, i dla 33 % mocy ok. 1717 ppm. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 181 ppm do poziomu 817 ppm dla 15 kW, o 111 ppm do poziomu 316 ppm dla 10 kW oraz o 605 ppm do poziomu 1112 ppm dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem pierwszej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok zawartości tlenu węgla do poziomu 10399 ppm podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do wartości 13805 ppm przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do poziomu 6154 ppm w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót wartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 836 ppm, dla 10 kW wyniosła 820 ppm oraz dla poziomu 5 kW mocy 1538 ppm. Na rysunku 6.59 zaprezentowano przebiegi zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 404 °C, dla 66 % mocy 300 °C, i dla 33 % mocy 225 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 23 °C do 381 °C dla 15 kW, o 14 °C do 286 °C dla 10 kW oraz o 10 °C do 215 °C dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem pierwszej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił wzrost temperatury spalin do 411 °C podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do 331 °C przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do 265 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie wartości temperatur spalin utrzymywała się na podobnych poziomach.

W tabeli 6.4 (załącznik nr 1) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska pierwszej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.57 do 6.59. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą.

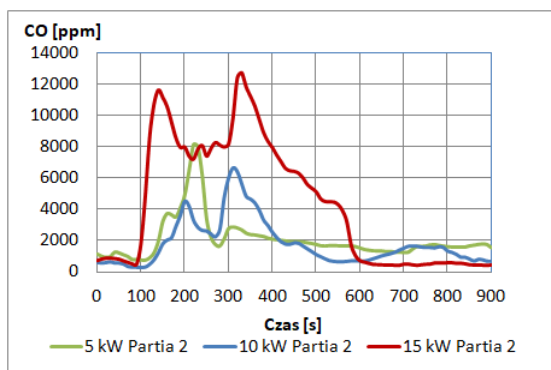
Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów.

Na rysunku 6.60 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 9,90 %, dla 66 % mocy ok. 13,49 % i dla 33 % mocy ok. 15,88 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 5,28 % do poziomu 15,18 % dla 15 kW, o 3,79 % do poziomu 17,28 % dla 10 kW oraz o 2,30 % do poziomu 18,18 % dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem drugiej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny spadek wartości tlenu o 11,86 % do poziomu 3,32 % podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, o 13,66 % do wartości 3,61 % przy mocy wynoszącej 10 kW oraz o 12,56 % do poziomu 5,61 % w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 10,89 %, dla 10 kW wyniosła 15,07 % oraz dla poziomu 5 kW mocy 15,17 %. Na rysunku 6.61 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenu węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenu węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 857 ppm, dla 66 % mocy ok. 619 ppm, i dla 33 % mocy ok. 1068 ppm. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 347 ppm do poziomu 510 ppm dla 15 kW, o 307 ppm do poziomu 312 ppm dla 10 kW oraz o 329 ppm do poziomu 739 ppm dla pracy kotła przy

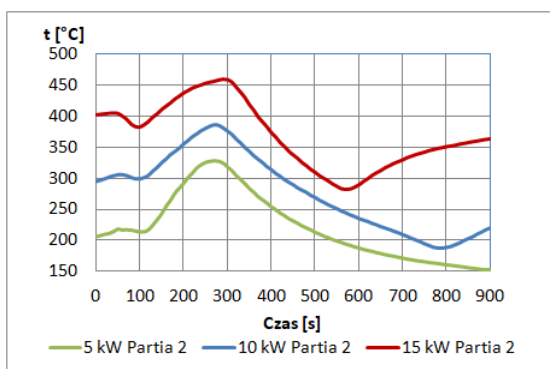
mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem drugiej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok zawartości tlenu węgla do poziomu 12729 ppm podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do wartości 6623 ppm przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do poziomu 8167 ppm w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. Wysokie wartości tlenu węgla zmieniały poziom w czasie wraz z zapaleniem się kolejnych części niejednorodnego odpadu w postaci obuwia. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 476 ppm, dla 10 kW wyniosła 704 ppm oraz dla poziomu 5 kW mocy 1533 ppm. Na rysunku 6.62 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 405 °C, dla 66 % mocy 306 °C, i dla 33 % mocy 218 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 22 °C do 383 °C dla 15 kW, o 7 °C do 299 °C dla 10 kW oraz o 13 °C do 205 °C dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem drugiej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił wzrost temperatury spalin do 460 °C podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do 387 °C przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do 329 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 15 kW do 290 °C, dla 10 kW do 235 °C oraz dla poziomu mocy 5 kW do 187 °C, a następnie jej wzrost dla mocy 15 kW do 364 °C, dla mocy 10 kW do 220 °C. W przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW temperatura spalin dalej spadała i osiągnęła poziom 152 °C. W tabeli 6.5 (załącznik nr 1) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska drugiej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.60 do 6.62. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne wartości przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą.



Rys. 6.60. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.61. Zawartość tlenu węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

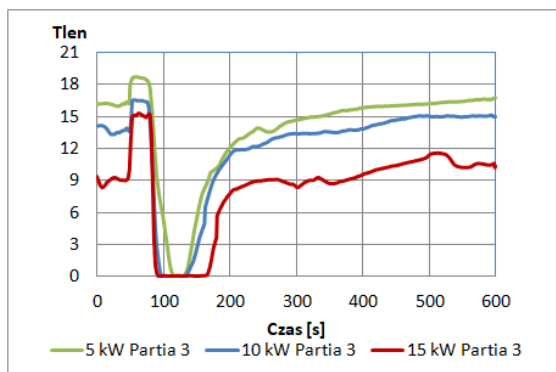


Rys. 6.62. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

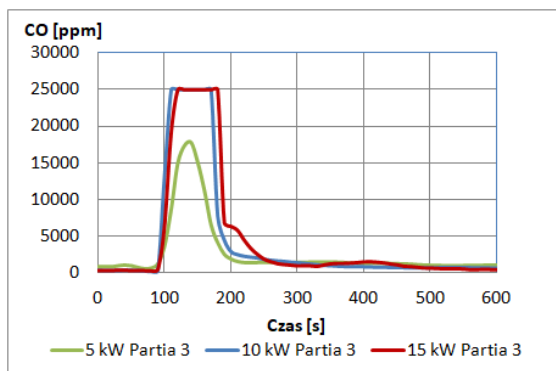
Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów.

Na rysunku 6.63 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 9,00 %, dla 66 % mocy ok. 13,38 % i dla 33 % mocy ok. 16,38 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 6,38 % do poziomu 15,38 % dla 15 kW, o 3,30 % do poziomu 16,68 % dla 10 kW oraz o 2,49 % do poziomu 18,87 % dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem trzeciej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 15,35 % do poziomu 0,03 % podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, o 16,65 % do wartości 0,04 % przy mocy wynoszącej 10 kW oraz o 18,84 % do poziomu 0,04 % w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 10,39 %, dla 10 kW wyniosła 15,86 % oraz dla poziomu 5 kW mocy 16,79 %. Na rysunku 6.64 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenku węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenku węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 276 ppm, dla 66 % mocy ok. 368 ppm, i dla 33 % mocy ok. 862 ppm. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek zawartości tlenku węgla o 64 ppm do poziomu 212 ppm dla 15 kW, o 145 ppm do poziomu 223 ppm dla 10 kW oraz o 345 ppm do poziomu 517 ppm dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem trzeciej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenku węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 15 oraz 10 kW poziom tlenku węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas ok. 70s. W przypadku pracy kotła na poziomie 5 kW wartość tlenku węgla wzrosła do poziomu 17733 ppm. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenku węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 377 ppm, dla 10 kW wyniosła 391 ppm oraz dla poziomu 5 kW mocy 991 ppm. Na rysunku 6.65 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 400 °C, dla 66 % mocy 326 °C, i dla 33 % mocy 207 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 19 °C do 381 °C dla 15 kW, o 11 °C do 315 °C dla 10 kW oraz o 4 °C do 203 °C dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem trzeciej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych nastąpił wzrost temperatury spalin do 452 °C podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do 389 °C przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do 321 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 15 kW do 343 °C, dla 10 kW do 222 °C oraz dla poziomu mocy 5 kW do 173 °C.

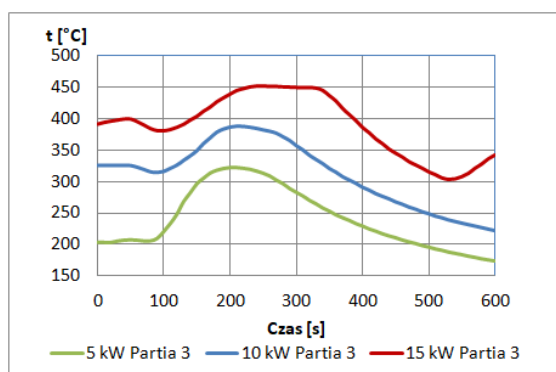
W tabeli 6.6 (załącznik nr 1) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska trzeciej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.63 do 6.65. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenku węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.63. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.64. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

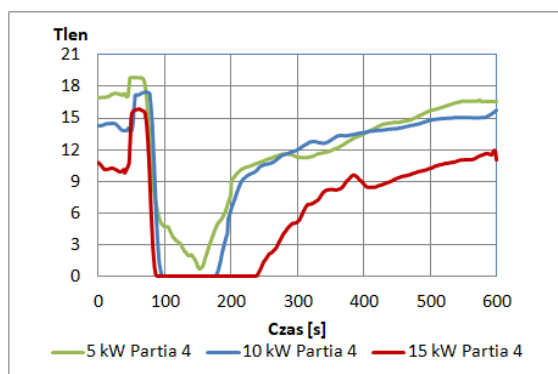


Rys. 6.65. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

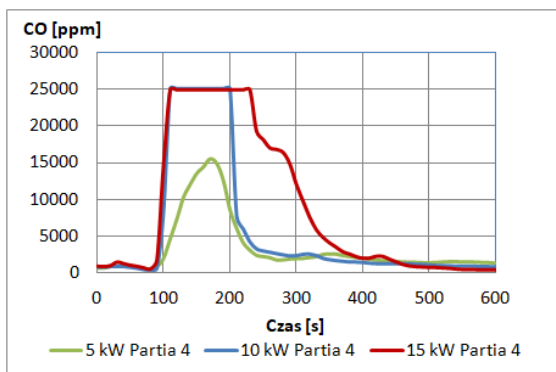
Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów.

Na rysunku 6.66 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 10,19 %, dla 66 % mocy ok. 13,69 % i dla 33 % mocy ok. 17,08 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 5,80 % do poziomu 15,99 % dla 15 kW, o 3,78 % do poziomu 17,48 % dla 10 kW

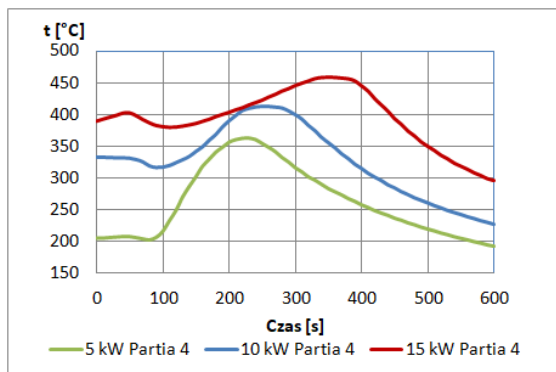
oraz o 1,89 % do poziomu 18,98 % dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem czwartej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 15,96 % do poziomu 0,03 % podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, o 17,44 % do wartości 0,03 % przy mocy wynoszącej 10 kW oraz o 18,66 % do poziomu 0,31 % w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 11,59 %, dla 10 kW wyniosła 15,38 % oraz dla poziomu 5 kW mocy 14,98 %. Na rysunku 6.67 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenu węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenu węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 1128 ppm, dla 66 % mocy ok. 891 ppm, i dla 33 % mocy ok. 795 ppm. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 572 ppm do poziomu 556 ppm dla 15 kW, o 418 ppm do poziomu 473 ppm dla 10 kW oraz o 288 ppm do poziomu 507 ppm dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem czwartej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenu węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 15 oraz 10 kW poziom tlenu węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas kolejno ok. 130 s oraz 100 s. W przypadku pracy kotła na poziomie 5 kW wartość tlenu węgla wzrosła do poziomu 15537 ppm. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 447 ppm, dla 10 kW wyniosła 917 ppm oraz dla poziomu 5 kW mocy 1293 ppm. Na rysunku 6.68 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 402 °C, dla 66 % mocy 331 °C, i dla 33 % mocy 207 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 23 °C do 379 °C dla 15 kW, o 15 °C do 316 °C dla 10 kW oraz o 5 °C do 202 °C dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem czwartej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił wzrost temperatury spalin do 458 °C podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do 413 °C przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do 363 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 15 kW do 295 °C, dla 10 kW do 227 °C oraz dla poziomu mocy 5 kW do 192 °C. W tabeli 6.7 (załącznik nr 1) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska czwartej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.66 do 6.68. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenu węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.66. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.67. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



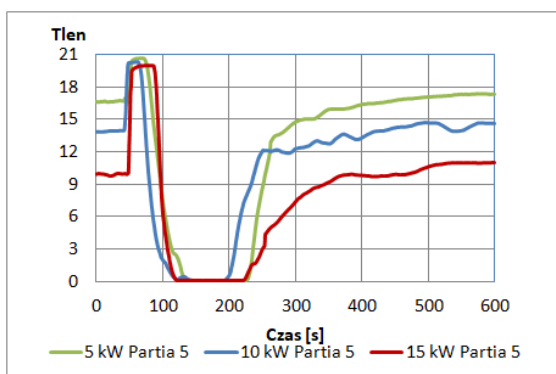
Rys. 6.68. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów.

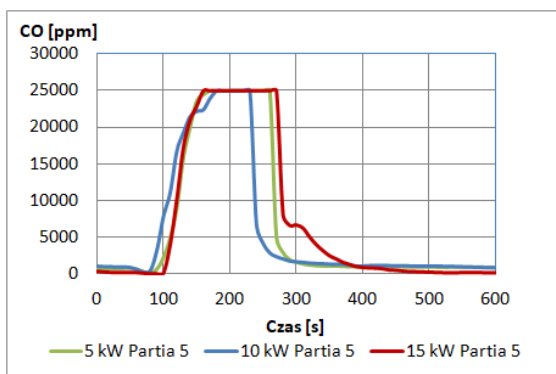
Na rysunku 6.69 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 10,00 %, dla 66 % mocy ok. 14,27 % i dla 33 % mocy ok. 16,78 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 10,08 % do poziomu 20,08 % dla 15 kW, o 6,20 % do poziomu 20,48 % dla 10 kW oraz o 4,01 % do poziomu 20,79 % dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem piątej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 20,05 % do poziomu 0,04 % podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, o 20,44 % do wartości 0,04 % przy mocy wynoszącej 10 kW oraz o 20,75 % do poziomu 0,03 % w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 11,59 %, dla 10 kW wyniosła 15,88 % oraz dla poziomu 5 kW mocy 17,37 %. Na rysunku 6.70 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenku węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenku węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 293 ppm, dla 66 % mocy ok. 952 ppm, i dla 33 % mocy ok. 801 ppm. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek zawartości tlenku węgla o 217 ppm do poziomu 76 ppm dla 15 kW, o 687 ppm do poziomu 265 ppm dla 10 kW oraz o 630 ppm do poziomu 171 ppm dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem piątej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenku węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 15, 10 oraz 5 kW poziom tlenku węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas kolejno ok. 120 s, 60 s oraz 100 s. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenku węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła ona poziom 185 ppm, dla 10 kW wyniosła 851 ppm oraz dla poziomu 5 kW mocy 903 ppm. Na

rysunku 6.71 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 335 °C, dla 66 % mocy 244 °C, i dla 33 % mocy 147 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 77 °C do 257 °C dla 15 kW, o 36 °C do 209 °C dla 10 kW oraz o 11 °C do 136 °C dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem piątej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił wzrost temperatury spalin do 456 °C podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do 362 °C przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do 266 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 15 kW do 292 °C, dla 10 kW do 235 °C oraz dla poziomu mocy 5 kW do 182 °C.

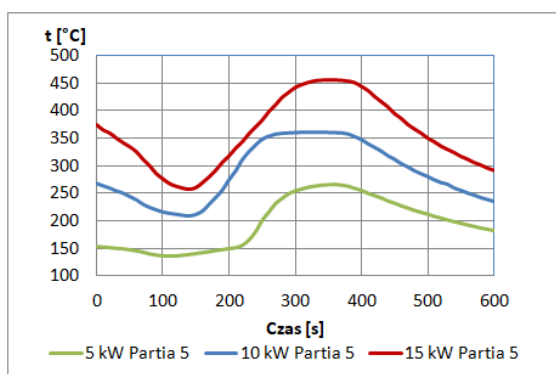
W tabeli 6.8 (załącznik nr 1) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska piątej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.69 do 6.71. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenku węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.69. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.70. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

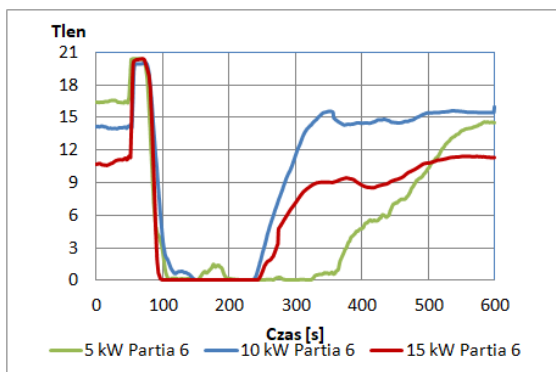


Rys. 6.71. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

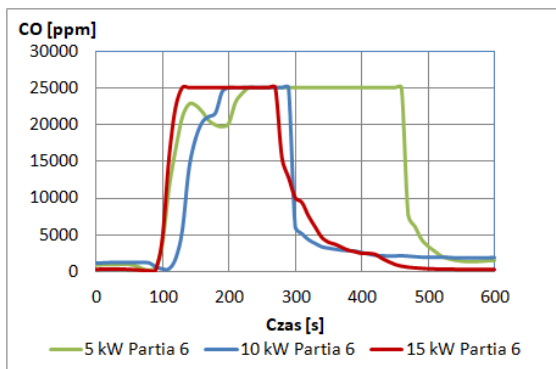
Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów.

Na rysunku 6.72 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadów. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 11,19 %, dla 66 % mocy ok. 13,98 % i dla 33 % mocy ok. 16,47 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 9,20 % do poziomu 20,38 % dla 15 kW, o 6,39 % do poziomu 20,38 % dla 10 kW oraz o 3,91 % do poziomu 20,38 % dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem szóstej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 20,35 % do poziomu 0,04 % podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, o 20,34 % do wartości 0,04 % przy mocy wynoszącej 10 kW oraz o 20,35 % do poziomu 0,03 % w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła poziom 11,99 %, dla 10 kW wyniosła 16,58 % oraz dla poziomu 5 kW mocy 14,49 %. Na rysunku 6.73 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenku węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadów. Średnia wartość początkowa zawartości tlenku węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 284 ppm, dla 66 % mocy ok. 1265 ppm, i dla 33 % mocy ok. 1018 ppm. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek zawartości tlenku węgla o 196 ppm do poziomu 88 ppm dla 15 kW, o 858 ppm do poziomu 407 ppm dla 10 kW oraz o 772 ppm do poziomu 246 ppm dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem szóstej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenku węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 15, 10 oraz 5 kW poziom tlenku węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas kolejno ok. 150 s, 100 s oraz 300 s. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenku węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 15 kW osiągnęła ona poziom 239 ppm, dla 10 kW wyniosła 1955 ppm oraz dla poziomu 5 kW mocy 1585 ppm. Na rysunku 6.74 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadów. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 336 °C, dla 66 % mocy 242 °C, i dla 33 % mocy 148 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 64 °C do 272 °C dla 15 kW, o 38 °C do 204 °C dla 10 kW oraz o 11 °C do 137 °C dla pracy kotła przy mocy 5 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem szóstej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych nastąpił wzrost temperatury spalin do 437 °C podczas pracy kotła przy mocy 15 kW, do 382 °C przy mocy wynoszącej 10 kW oraz do 181 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 5 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 15 kW do 297 °C, dla 10 kW do 242 °C oraz dla poziomu mocy 5 kW do 167 °C.

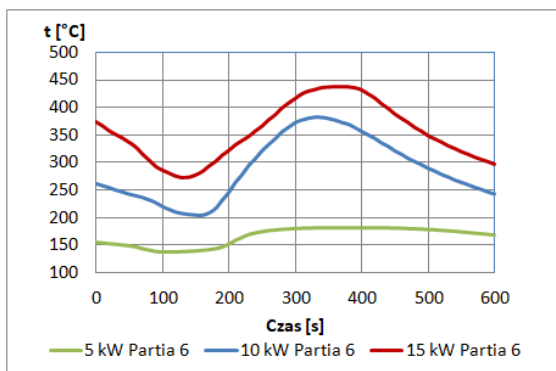
W tabeli 6.9 (załącznik nr 1) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska szóstej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.72 do 6.74. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenku węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.72. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.73. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW



Rys. 6.74. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 5, 10 oraz 15 kW

6.3. Analiza pracy kotła Tilgner EKR 20

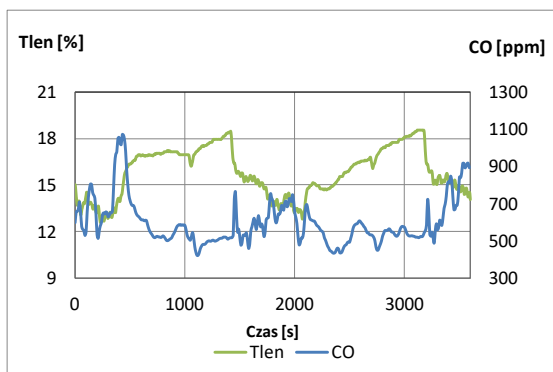
W trakcie badań eksperymentalnych analizowano proces spalania paliwa podstawowego oraz jego współspalania z odpadami przy różnych mocach cieplnych kotła Tilgner EKR 20. Paliwo podstawowe oraz partie odpadów współspalane z paliwem podstawowym zostały opisane w rozdziale 5 w tabelach 5.1 oraz 5.2.

6.3.1. Praca kotła z mocą 7 kW

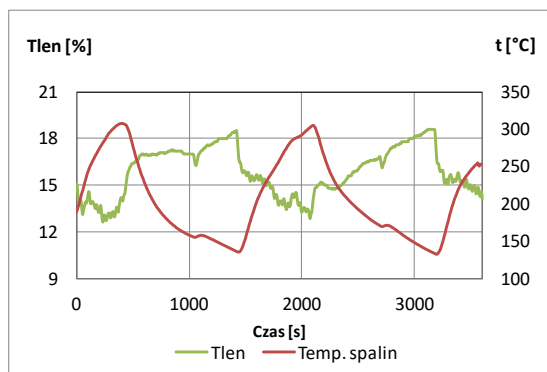
Wyniki badań podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta.

Na rysunkach 6.75 i 6.76 przedstawiono wykresy zestawiające pomiar temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta, na które zaprojektowano kocioł. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wyniósł 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 7,19 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 12,46 ÷ 18,58 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 15,86 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla

wahał się między 420 ÷ 1071 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 597 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 132 °C a 307 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 208 °C. Częstotliwość (okres) pracy w pojedynczym cyklu uwzględniający pracę wentylatora i ślimakowego podajnika paliwa oscylował w granicach 1800 s.



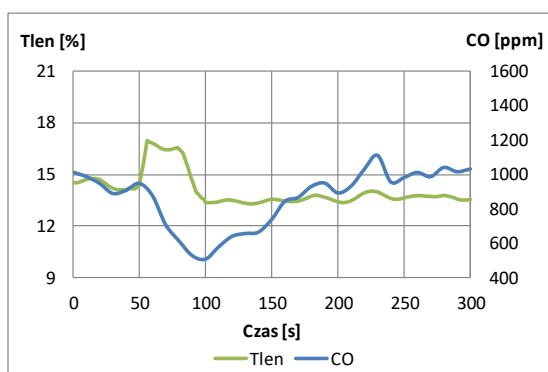
Rys. 6.75. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 7 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta



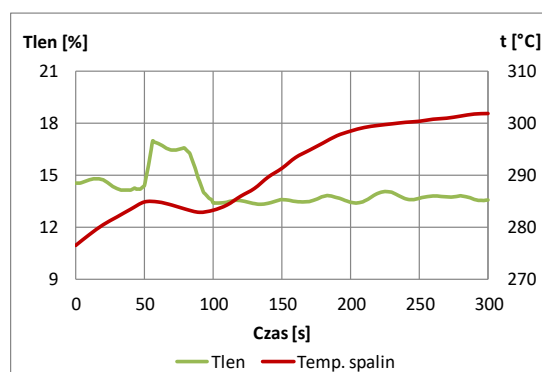
Rys. 6.76. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 7 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta

Wyniki badań podczas pracy kotła w warunkach niewłaściwej eksploatacji kotłów.

Na rysunkach od 6.77 do 6.90 przedstawiono zmiany wartości temperatury oraz zawartość tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła na poziomie 33 % mocy znamionowej (ok. 7 kW). Z powodu prezentacji wyników z dużą dokładnością na wykresach pokazano część cyklu pracy kotła po doprowadzeniu do paleniska odpadu. Długość pomiaru zależna była od czasu powrotu poziomu zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła i wahała się od 300 s do 900 s. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60 °C i oscylowała między 57 ÷ 63 °C. Pomiarzy zostały wykonane w momencie, kiedy temperatura wody na wyjściu z kotła wynosiła 60 °C. Na rysunkach od 6.77 do 6.88 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym rosła temperatura spalin i wraz z nią temperatura wody na wyjściu z kotła. Z kolei wykresy przedstawione na rysunkach 6.89 oraz 6.90 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym malała temperatura spalin oraz temperatura wody na wyjściu z kotła.



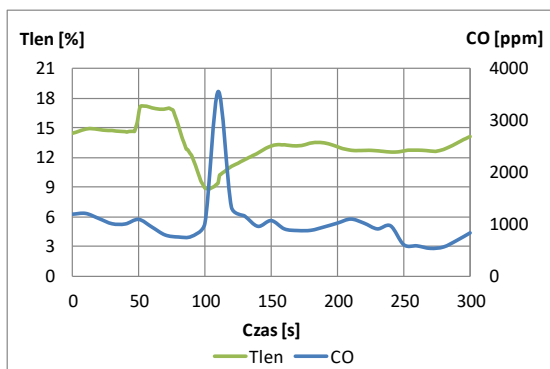
Rys. 6.77. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 7 kW



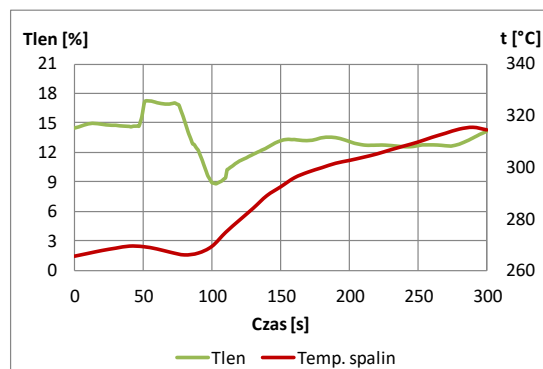
Rys. 6.78. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

Na rysunkach 6.77 i 6.78 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Tilgner EKR 20. Czas pomiaru wynosił 300 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,98 ÷ 14,77 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 888 ÷ 1012 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 276 °C do 302 °C. Po otwarciu

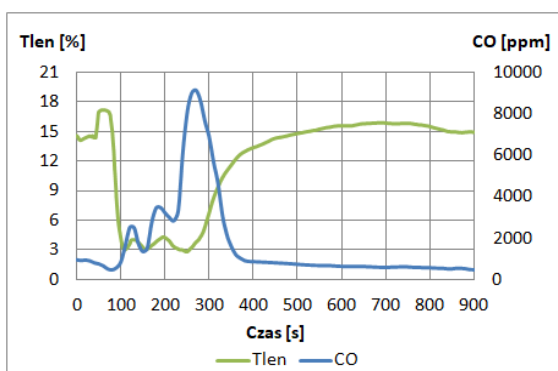
drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 16,99 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 504 ppm oraz spadek temperatury spalin do 283 °C. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych zaobserwowano powrót wartości tlenu oraz tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 302 °C. Na rysunkach 6.79 i 6.80 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Czas pomiaru wynosił 300 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 14,38 ÷ 14,97 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 1011 ÷ 1214 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 266 °C do 369 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 17,37%, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 760 ppm oraz spadek temperatury spalin do 266 °C. Po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 8,69 %, zawartość tlenku węgla wrosła do 3560 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 308 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom ok. 315 °C.



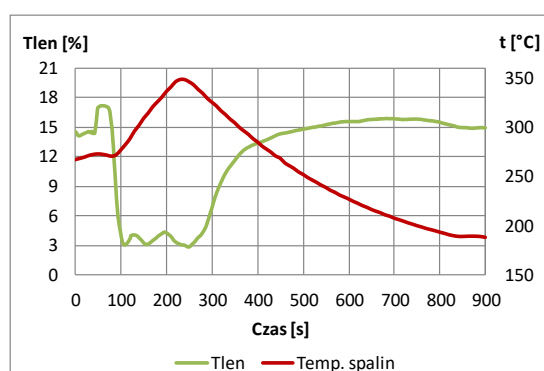
Rys. 6.79. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW



Rys. 6.80. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW



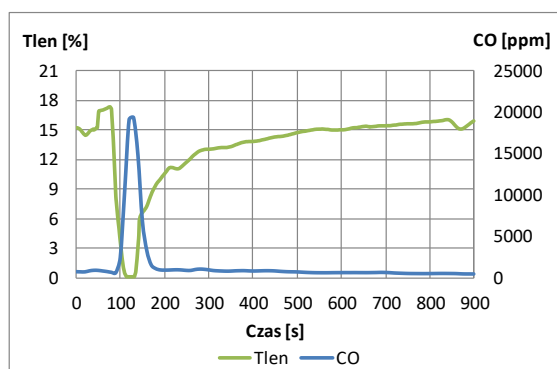
Rys. 6.81. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW



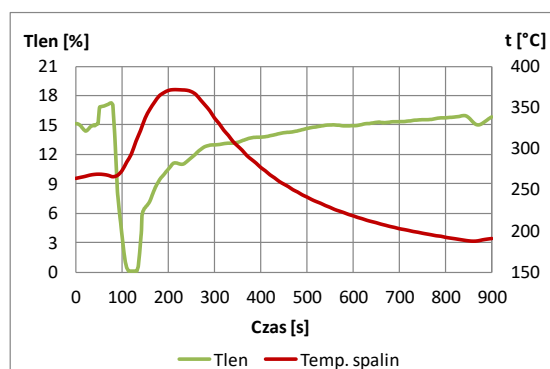
Rys. 6.82. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

Na rysunkach 6.81 oraz 6.82 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,98 ÷ 14,77 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 768 ÷ 967 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 267 °C do 273 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 17,18 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 480 ppm oraz spadek temperatury spalin do 267 °C. Po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów oraz zamknięciu

drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 2,61 %, zawartość tlenu węgla skokowo wzrosła do 9164 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 349 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenu węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 188 °C.

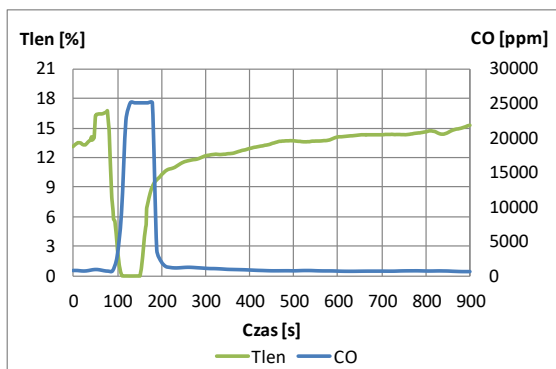


Rys. 6.83. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

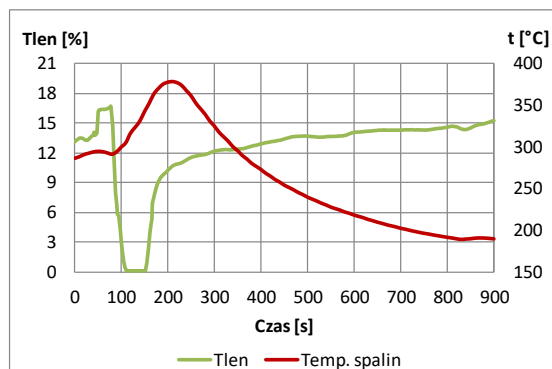


Rys. 6.84. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

Na rysunkach 6.83 i 6.84 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadów w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $14,38 \div 15,18$ %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $726 \div 913$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 264 °C do 269 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $17,37$ %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 632 ppm oraz spadek temperatury spalin do 264 °C. Po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03$ %, zawartość tlenku węgla wzrosła do 19301 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 372 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła spadać i osiągnęła poziom 219 °C. Na rysunkach 6.85 i 6.86 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadów w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $12,78 \div 13,97$ %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $725 \div 935$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 286 °C do 295 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $16,98$ %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 696 ppm oraz spadek temperatury spalin do 286 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03$ %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 378 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 218 °C.

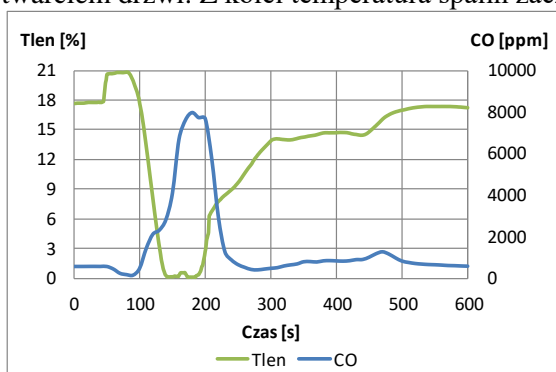


Rys. 6.85. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

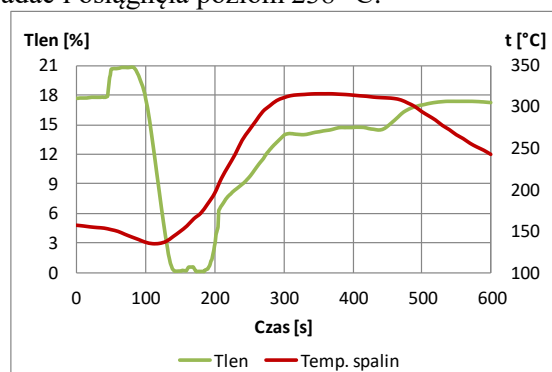


Rys. 6.86. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

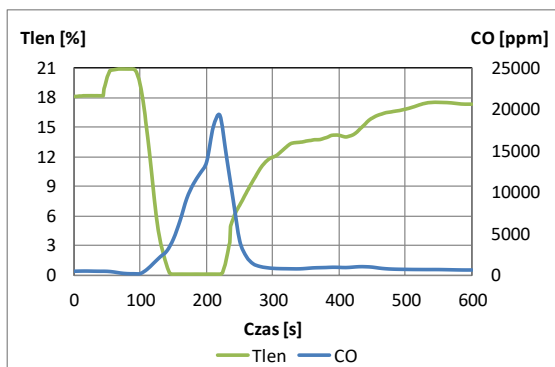
Na rysunkach 6.87 i 6.88 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $17,68 \div 17,88 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $578 \div 583$ ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 286 °C do 295 °C . Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $20,89 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 160 ppm oraz gwałtowniejszy spadek temperatury spalin do 286 °C . Po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 7997 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 378 °C . Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 218 °C . Na rysunkach 6.89 i rysunkach 6.90 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $18,06 \div 18,17 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $422 \div 455$ ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 142 °C do 138 °C . Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $20,89 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 130 ppm oraz spadek temperatury spalin do 125 °C . Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 19365 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 318 °C . Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła spadać i osiągnęła poziom 238 °C .



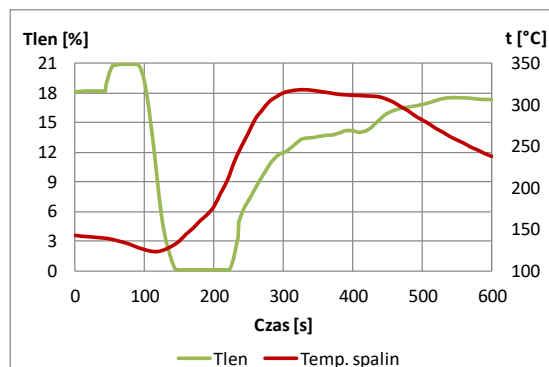
Rys. 6.87. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW



Rys. 6.88. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW



Rys. 6.89. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

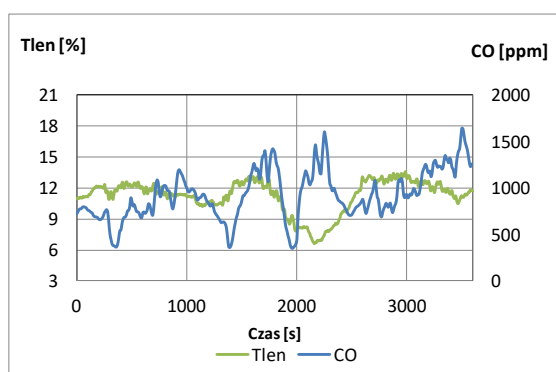


Rys. 6.90. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 7 kW

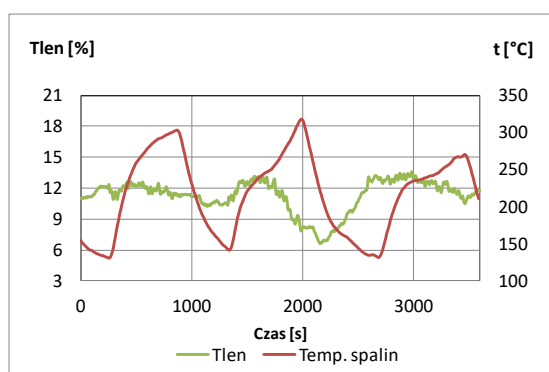
6.3.2. Praca kotła z mocą 13 kW

Wyniki badań podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta.

Na rysunkach 6.91 i 6.92 przedstawiono wykresy zestawiające pomiar temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta, na które zaprojektowano kocioł. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 12,96 kW.



Rys. 6.91. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 13 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta



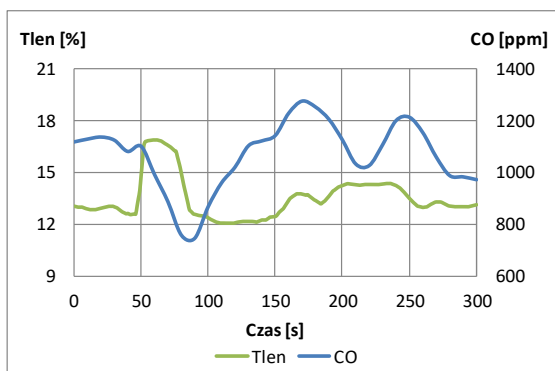
Rys. 6.92. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 13 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta

Poziom tlenu w spalinach oscylował między $6,61 \div 13,69$ %. Średnia wartość tlenu wynosiła 11,30 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między $354 \div 1640$ ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 931 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 131 °C a 318 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 217 °C. Częstotliwość (okres) pracy w pojedynczym cyklu, uwzględniający pracę wentylatora i ślimakowego podajnika paliwa, oscylował w granicach 1000 s.

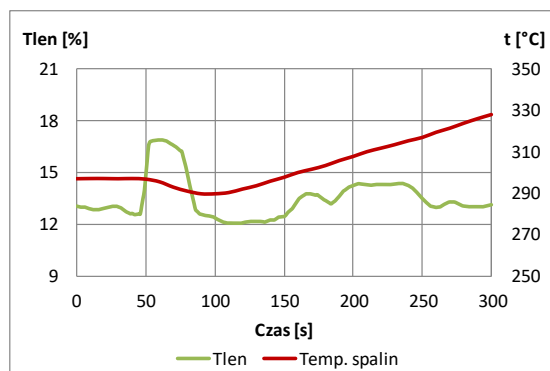
Wyniki badań podczas pracy kotła w warunkach niewłaściwej eksploatacji kotłów.

Na rysunkach od 6.93 do 6.116 przedstawiono zmiany wartości temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła na poziomie 66 % mocy znamionowej (ok. 13 kW). Z powodu prezentacji wyników z dużą dokładnością na wykresach pokazano część cyklu pracy kotła po doprowadzeniu do paleniska odpadu. Długość pomiaru zależna była od czasu powrotu poziomu zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła i wahała się

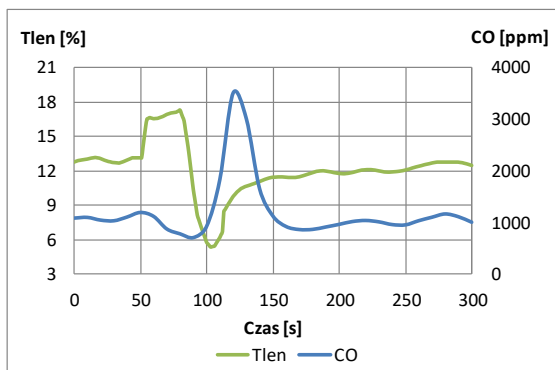
od 300 s do 900 s. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60 °C i oscylowała między 57 ÷ 63 °C. Pomiary zostały wykonane w momencie, kiedy temperatura wody na wyjściu z kotła wynosiła 60 °C. Na rysunkach od 6.93 do 6.114 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym rosła temperatura spalin i wraz z nią temperatura wody na wyjściu z kotła. Z kolei wykresy przedstawione na rysunkach 6.115 oraz 6.116 przedstawiają wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym malała temperatura spalin oraz temperatura wody na wyjściu z kotła. Na rysunkach 6.93 i 6.94 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Tilgner EKR 20. Czas pomiaru wynosił 300 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 12,37 ÷ 13,98 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 1082 ÷ 1138 ppm. Z kolei temperatura spalin utrzymywała się na poziomie ok. 297 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 16,99 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 744 ppm oraz spadek temperatury spalin do 290 °C. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych zaobserwowano powrót wartości tlenu oraz tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 328 °C.



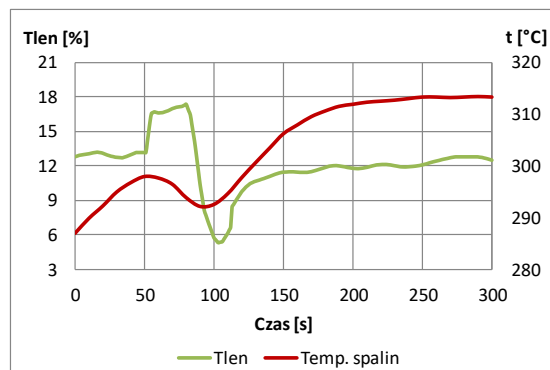
Rys. 6.93. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



Rys. 6.94. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



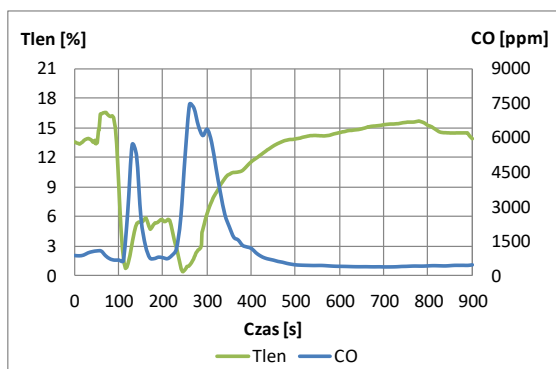
Rys. 6.95. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



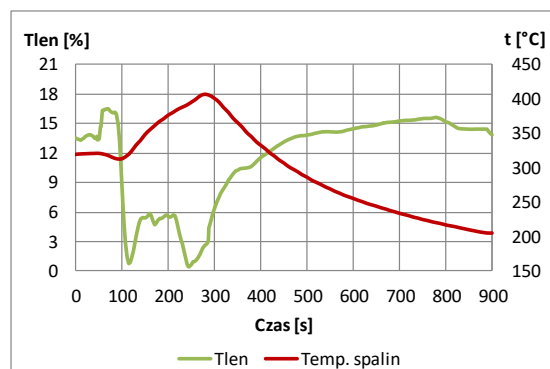
Rys. 6.96. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

Na rysunku 6.95 i 6.96 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Czas pomiaru wynosił 300 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 12,57 ÷ 13,27 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 1029 ÷ 1191 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 287 °C do 298 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 17,78 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 701 ppm oraz spadek temperatury spalin do 266 °C. Po doprowadzeniu

do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 4,92 %, zawartość tlenku węgla wzrosła do 3520 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 313 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom 313 °C. Na rysunkach 6.97 i 6.98 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,27 ÷ 13,98 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 869 ÷ 1082 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 319 °C do 321 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 16,68 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 680 ppm oraz spadek temperatury spalin do 313 °C. Po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,41 %, zawartość tlenku węgla wzrosła do 5707 ppm. Następnie na okres ok. 70 s zawartość tlenu w spalinach wzrosła do poziomu ok. 5 %, a zawartość tlenku węgla zmalała do poziomu ok. 900 ppm. Po tym okresie zanotowano kolejny spadek zawartości tlenu w spalinach do 0,20 %, a zawartość tlenku węgla wzrosła do 7475 ppm. W tym okresie temperatura spalin wzrosła do 406 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 206 °C.

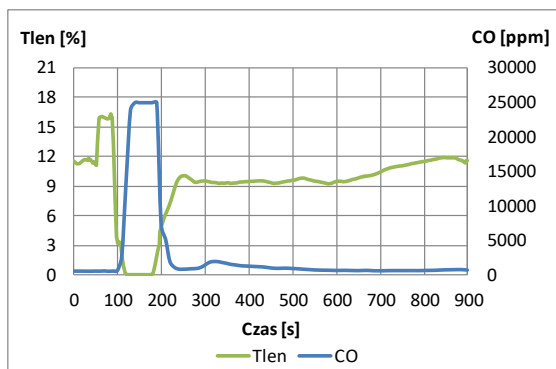


Rys. 6.97. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

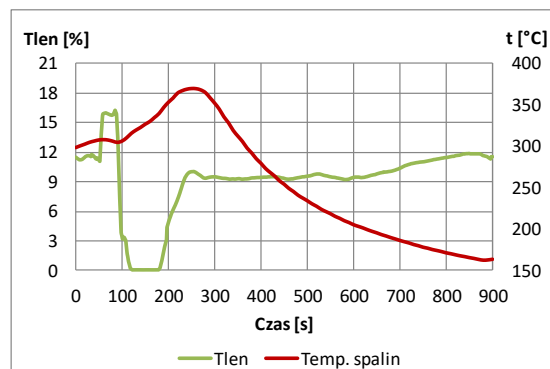


Rys. 6.98. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

Na rysunkach 6.99 i 6.100 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 10,98 ÷ 11,99 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 405 ÷ 546 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 298 °C do 308 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 16,89 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 531 ppm oraz spadek temperatury spalin do 305 °C. Po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych, gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 370 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin spadła do wartości 205 °C, a poziom tlenu wrósł do poziomu ok. 9 %.

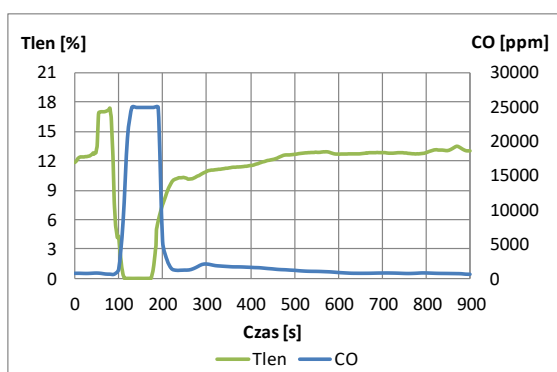


Rys. 6.99. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

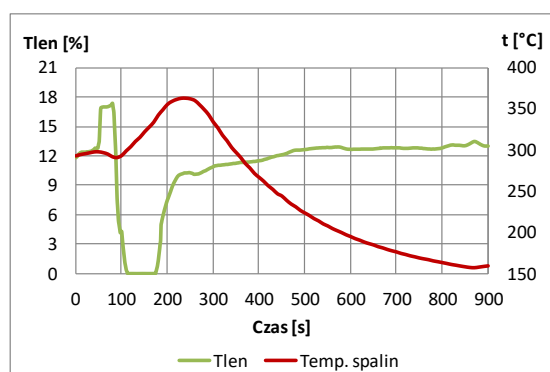


Rys. 6.100. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

Na rysunkach 6.101 oraz 6.102 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $11,68 \div 12,78 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $674 \div 731$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $293 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $298 \text{ } ^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $17,69 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 568 ppm oraz spadek temperatury spalin do $291 \text{ } ^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03 \%$, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $363 \text{ } ^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do $195 \text{ } ^\circ\text{C}$.



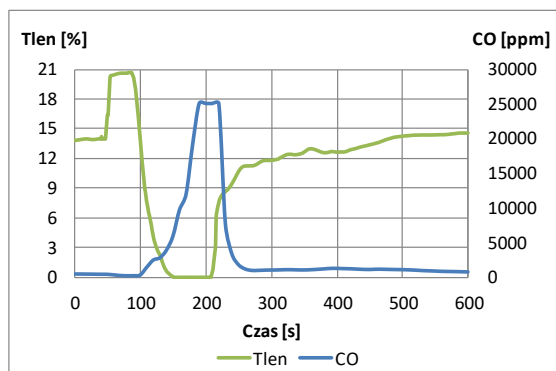
Rys. 6.101. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



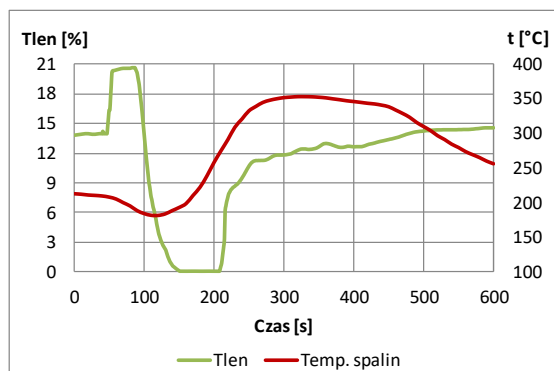
Rys. 6.102. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

Na rysunkach 6.103 i 6.104 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $13,78 \div 13,98 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $349 \div 397$ ppm. Z kolei temperatura spalin malała od $213 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $208 \text{ } ^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $20,78 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 147 ppm oraz gwałtowniejszy spadek temperatury spalin do $182 \text{ } ^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych, gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,03 \%$, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła

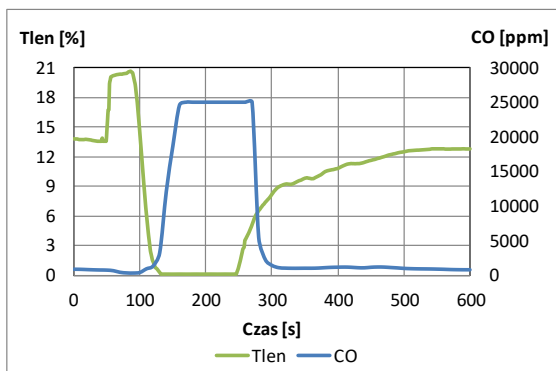
do 353 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do 256 °C.



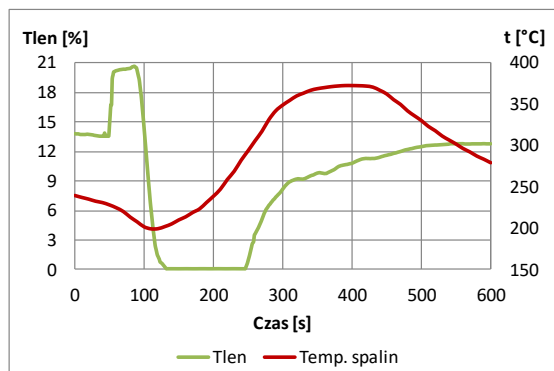
Rys. 6.103. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzenie do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



Rys. 6.104. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



Rys. 6.105. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzenie do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW



Rys. 6.106. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 13 kW

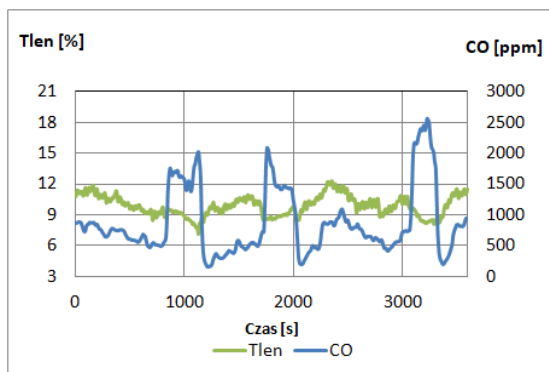
Na rysunkach 6.105 i 6.106 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 13,58 ÷ 13,88 %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między 641 ÷ 770 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 300 °C do 229 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 20,88 %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 216 ppm oraz spadek temperatury spalin do 200 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 373 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła spadać i osiągnęła poziom 280 °C.

6.3.3. Praca kotła z mocą znamionową 20 kW

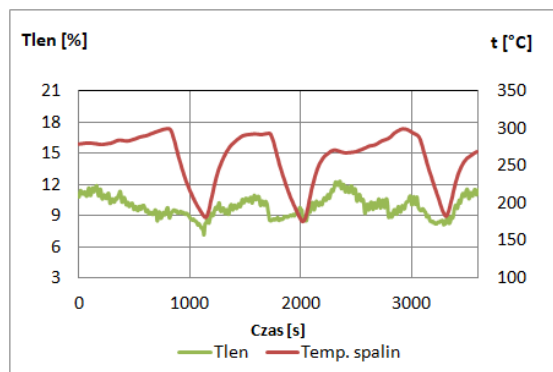
Wyniki badań podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa zaleconego przez producenta.

Na rysunkach 6.107 i 6.108 przedstawiono wykresy zestawiające pomiar temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy wykorzystaniu paliwa

zaleczonego przez producenta, na które zaprojektowano kocioł. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na wartość 60 °C. Czas pomiaru wynosił 3600 s (1 godz.). Średnia moc kotła podczas pomiaru wynosiła 20,23 kW. Poziom tlenu w spalinach oscylował między 6,81 ÷ 12,37 %. Średnia wartość tlenu wynosiła 9,91 %. Z kolei poziom zawartości tlenku węgla wahał się między 154 ÷ 2551 ppm. Średnia wartość tlenku węgla wynosiła 872 ppm. Poziom temperatury spalin oscylował między 175 °C a 300 °C. Średnia wartość temperatury spalin wynosiła 261 °C. Częstotliwość (okres) pracy w pojedynczym cyklu, uwzględniający pracę wentylatora i ślimakowego podajnika paliwa, oscylował w granicach 800 s.



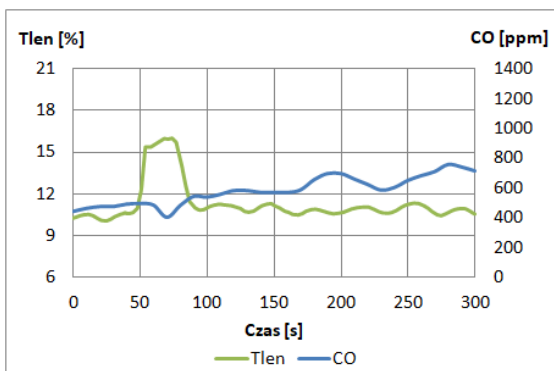
Rys. 6.107. Pomiar zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 20 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta



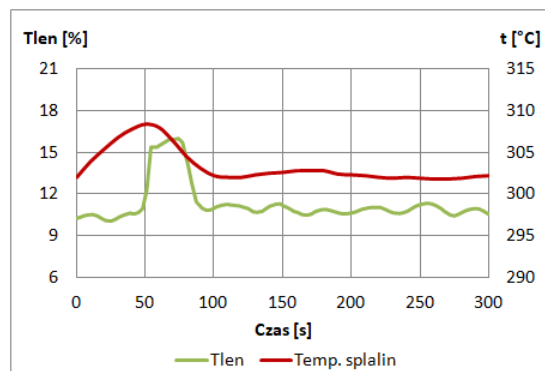
Rys. 6.108. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach podczas pracy kotła przy mocy 20 kW przy wykorzystaniu paliwa zaleczonego przez producenta

Wyniki badań podczas pracy kotła w warunkach niewłaściwej eksploatacji kotłów.

Na rysunkach od 6.109 do 6.122 przedstawiono zmiany wartości temperatury oraz zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach podczas pracy kotła na poziomie 66 % mocy znamionowej (ok. 20 kW). Z powodu prezentacji wyników z dużą dokładnością na wykresach pokazano część cyklu pracy kotła po doprowadzeniu do paleniska odpadu. Długość pomiaru zależna była od czasu powrotu poziomu zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła i wahała się od 300 s do 900 s. Temperatura wody na wyjściu z kotła została ustawiona na regulatorze pracy kotła na poziomie 60 °C i oscylowała między 57 ÷ 63 °C. Pomiarzy zostały wykonane w momencie, kiedy temperatura wody na wyjściu z kotła wynosiła 60 °C. Na rysunkach od 6.109 do 6.120 przedstawiono wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym rosła temperatura spalin i wraz z nią temperatura wody na wyjściu z kotła. Z kolei wykresy przedstawione na rysunkach 6.121 oraz 6.122 przedstawiają wyniki badań podczas etapu pracy kotła, w którym malała temperatura spalin oraz temperatura wody na wyjściu z kotła.

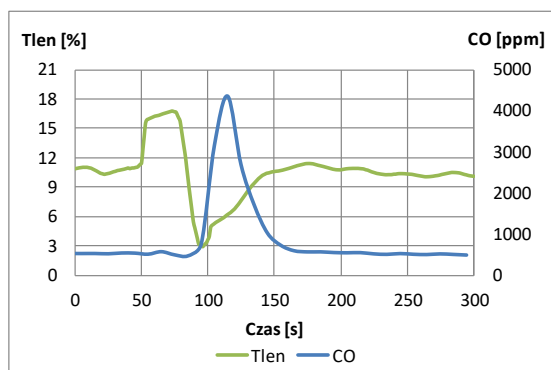


Rys. 6.109. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

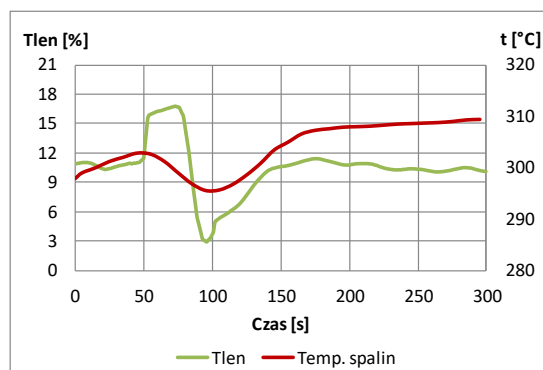


Rys. 6.110. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po otwarciu drzwi wyczystkowych podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

Na rysunkach 6.109 i 6.110 zaprezentowano przebiegi zmian w czasie temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek otwarcia drzwi wyczystkowych w kotle Tilgner EKR 20. Czas pomiaru wynosił 300 s. Drzwi otwarte zostały na czas 30 s w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $9,99 \div 10,99 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $441 \div 544$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $302 \text{ }^\circ\text{C}$ do $314 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $16,18 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 402 ppm oraz spadek temperatury spalin do $302 \text{ }^\circ\text{C}$. Po zamknięciu drzwi wyczystkowych zaobserwowano powrót wartości temperatury spalin oraz tlenu do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi. Z kolei wartość tlenku węgla osiągnęła poziom ok. 713 ppm i utrzymywała się na nim do końca pomiaru.

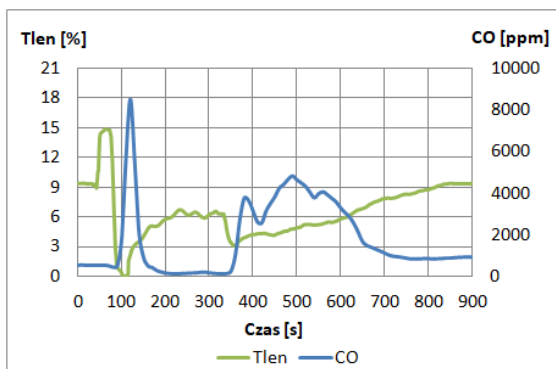


Rys. 6.111. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

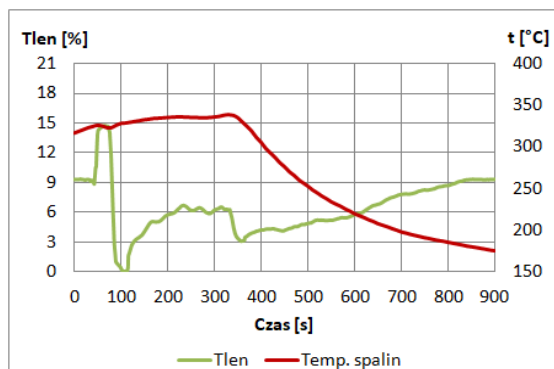


Rys. 6.112. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

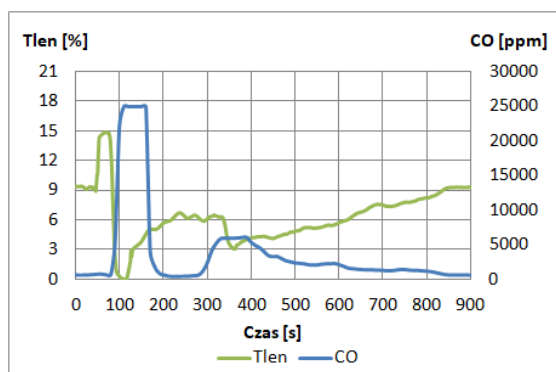
Na rysunkach 6.111 i 6.112 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Czas pomiaru wynosił 300 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $10,19 \div 11,49 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $498 \div 515$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $298 \text{ }^\circ\text{C}$ do $303 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $16,89 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 474 ppm oraz spadek temperatury spalin do $296 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $2,11 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 4362 ppm, a temperatura spalin wzrosła do $308 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin zaczęła rosnąć i osiągnęła poziom ok. $310 \text{ }^\circ\text{C}$. Na rysunkach 6.113 oraz 6.114 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu w postaci obuwia o masie 375 g. Czas pomiaru wynosił 900 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $8,10 \div 9,49 \%$, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $165 \div 527$ ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od $316 \text{ }^\circ\text{C}$ do $326 \text{ }^\circ\text{C}$. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $14,87 \%$, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 435 ppm oraz spadek temperatury spalin do $323 \text{ }^\circ\text{C}$. Po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $1,81 \%$, zawartość tlenku węgla wzrosła do 8498 ppm. Następnie na okres ok. 220 s zawartość tlenu w spalinach wzrosła do poziomu ok. $5,50 \%$, a zawartość tlenku węgla zmalała do poziomu ok. 226 ppm. Po tym okresie zanotowano kolejny spadek zawartości tlenu w spalinach do $3,01 \%$, a zawartość tlenku węgla wzrosła i oscylowała na poziomie ok. 3550 ppm. W tym okresie temperatura spalin wzrosła do $339 \text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenku węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi, a temperatura spalin spadła do $175 \text{ }^\circ\text{C}$.



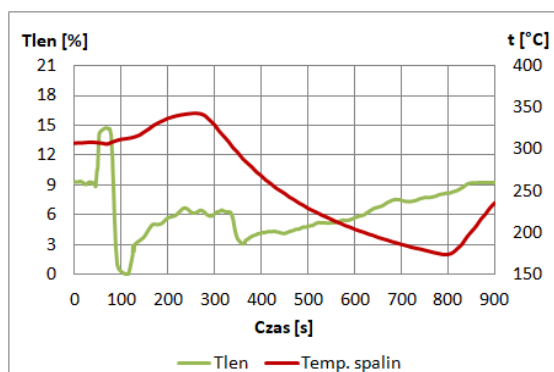
Rys. 6.113. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



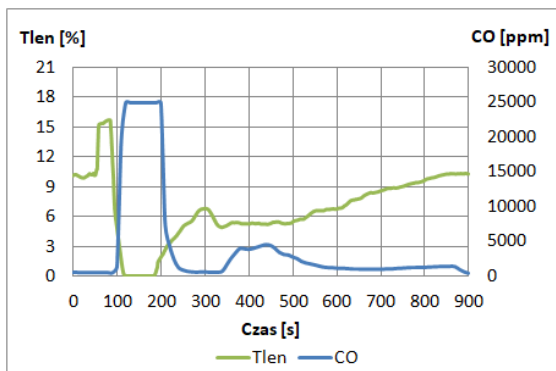
Rys. 6.114. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



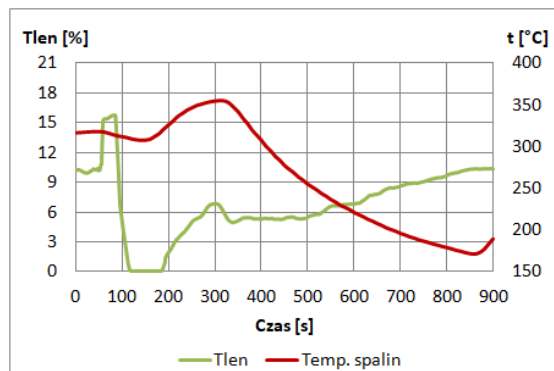
Rys. 6.115. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



Rys. 6.116. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



Rys. 6.117. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

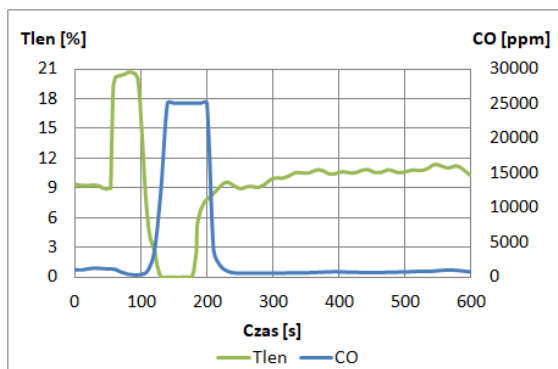


Rys. 6.118. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

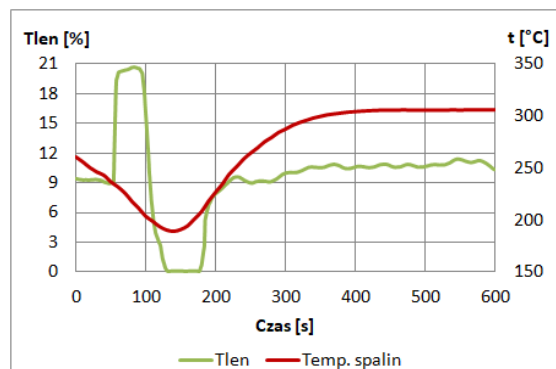
Na rysunkach 6.115 i 6.116 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między $8,01 \div 10,59$ %, a poziom zawartości tlenku węgla oscylował między $619 \div 732$ ppm. Z kolei temperatura spalin utrzymywała się na poziomie ok. 307 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu $14,87$ %, spadek wartości tlenku węgla do poziomu 626 ppm oraz spadek temperatury spalin do 306 °C. Po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do $0,04$ %, zawartość tlenku węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 343 °C. Wraz z częściowym wypaleniem palącej się części odpadu zaobserwowano spadek tlenku węgla do wartości

na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi oraz wzrost zawartości tlenu w spalinach do poziomu ok. 5 %. W wyniku rozpalenia się pozostałej części odpadu od 300 s pomiaru na okres ok. 150 s nastąpił wzrost zawartości tlenu węgla do wartości ok. 4922 ppm oraz chwilowy spadek zawartości tlenu do poziomu ok. 3,01 %. W wyniku wypalenia się pozostałej części odpadu temperatura spalin spadła do wartości 204 °C, poziom tlenu wrósł do poziomu 5,42 %. Z kolei wartość tlenu węgla osiągnęła poziom 2106 ppm.

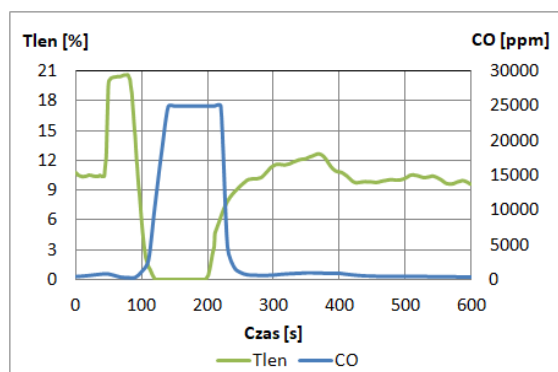
Na rysunkach 6.117 i 6.118 zaprezentowano wykresy przedstawiające zmianę w czasie wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenu węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 9,59 ÷ 10,49 %, a poziom zawartości tlenu węgla oscylował między 424 ÷ 554 ppm. Z kolei temperatura spalin rosła od 316 °C do 318 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 15,77 %, spadek wartości tlenu węgla do poziomu 536 ppm oraz spadek temperatury spalin do 307 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenu węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 355 °C. Wraz z częściowym wypaleniem się odpadu zaobserwowano spadek tlenu węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi oraz wzrost zawartości tlenu w spalinach do poziomu ok. 7 %. Od 350 s pomiaru na okres ok. 200 s nastąpił wzrost zawartości tlenu węgla do wartości ok. 3183 ppm oraz chwilowy spadek zawartości tlenu do poziomu ok. 4,82 %. W wyniku wypalenia się pozostałej części odpadu temperatura spalin spadła do wartości 221 °C, poziom tlenu wrósł do poziomu ok. 6,62 %. Z kolei wartość tlenu węgla osiągnęła poziom ok. 436 ppm. Na rysunkach 6.119 oraz 6.120 przedstawiono wykresy temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenu węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 300 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 8,89 ÷ 9,39 %, a poziom zawartości tlenu węgla oscylował między 950 ÷ 1220 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 261 °C do 237 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 20,78 %, spadek wartości tlenu węgla do poziomu 252 ppm oraz gwałtowniejszy spadek temperatury spalin do 189 °C. Po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenu węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 306 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenu węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi. Na rysunkach 6.121 i 6.122 przedstawiono zmianę poziomu temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenu węgla na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masie 600 gramów. Czas pomiaru wynosił 600 s. Odpad został doprowadzony w osiemdziesiątej sekundzie w trakcie otwarcia drzwi wyczystkowych na czas 30 s. Poziom tlenu w spalinach wahał się między 10,29 ÷ 11,18 %, a poziom zawartości tlenu węgla oscylował między 398 ÷ 755 ppm. Z kolei temperatura spalin malała od 313 °C do 290 °C. Po otwarciu drzwi zaobserwowano nagły wzrost wartości tlenu do poziomu 20,58 %, spadek wartości tlenu węgla do poziomu 227 ppm oraz spadek temperatury spalin do 228 °C. Po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych gwałtownie spadła zawartość tlenu w spalinach do 0,03 %, zawartość tlenu węgla przekroczyła górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm, a temperatura spalin wzrosła do 301 °C. Wraz z wypaleniem się odpadu zaobserwowano powrót wartości tlenu, tlenu węgla do wartości na podobnym poziomie, co przed otwarciem drzwi. Z kolei temperatura spalin w dalszym ciągu rosła i osiągnęła poziom 319 °C.



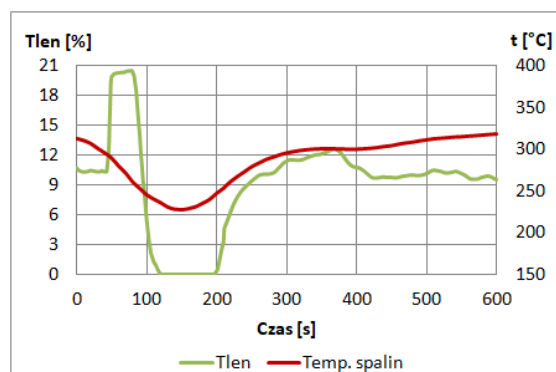
Rys. 6.119. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



Rys. 6.120. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



Rys. 6.121. Pomiar zawartości tlenu oraz tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW



Rys. 6.122. Pomiar temperatury oraz zawartości tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła przy mocy 20 kW

6.3.4. Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy z mocą 7, 13 i 20 kW

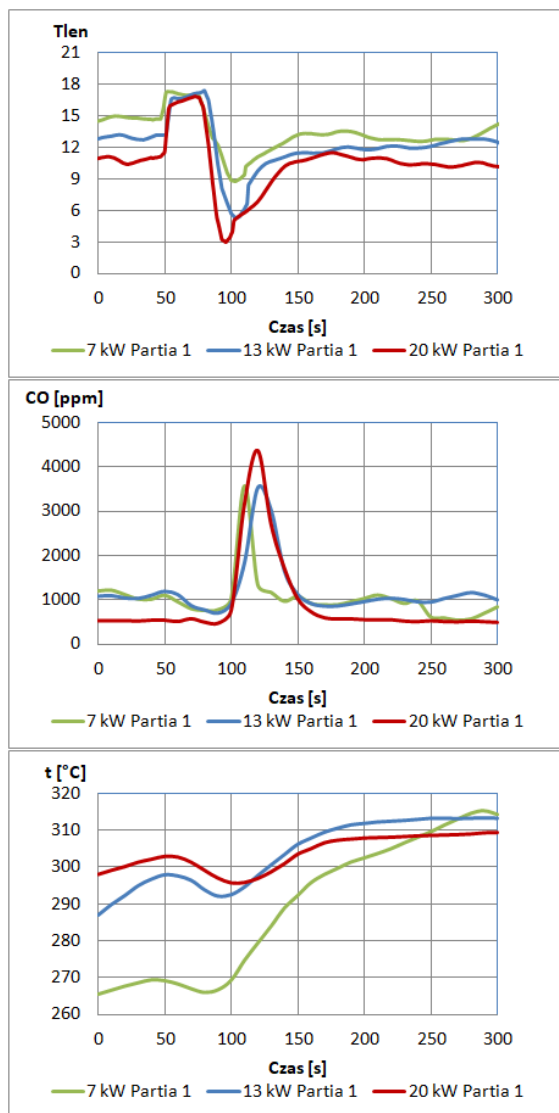
Na rysunkach od 6.123 do 6.140 zaprezentowano zestawienie wyników badań podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy: 7, 13 oraz 20 kW. Wykresy przedstawiają różnicę poziomów wartości temperatury spalin oraz zawartości w nich tlenu i tlenku węgla w zależności od mocy, z jaką kocioł pracował na skutek doprowadzenia do paleniska kotła wcześniej przygotowanych sześciu partii odpadów. W tabelach od 6.123 do 6.128 przedstawiono zmianę wartości temperatury spalin oraz zawartość w nich tlenu i tlenku węgla, podzieloną na cztery charakterystyczne okresy, identycznie, jak w przypadku kotła Heiztechnik Q EKO 15. Analogicznie pierwszy okres przedstawia poziom tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin podczas pracy kotła przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych. Podczas tego okresu wartości tlenu oraz tlenku węgla oscylowały na poziomach referencyjnych dla pracy kotła z danym obciążeniem. Z kolei temperatura spalin rosła albo spadała w zależności od cyklu pracy kotła. Drugi okres przedstawia zmianę mierzonych wartości w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w celu doprowadzenia odpadu. Rozpoczyna się on w pięćdziesiątej sekundzie pomiaru i charakteryzuje się nagłym wzrostem wartości tlenu. Poziom ten utrzymuje się na czas otwarcia drzwiczek wyczystkowych przez okres 30 s. Ten okres charakteryzuje się również spadkiem poziomu zawartości tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury. Następuje to w wyniku wychłodzenia komory spalania z powodu otwartych drzwiczek. Trzeci okres rozpoczyna się w osiemdziesiątej sekundzie pomiaru po doprowadzeniu do paleniska wcześniej przygotowanej wyselekcjonowanej partii odpadu oraz zamknięciu drzwiczek kotła. Okres ten charakteryzuje się gwałtownym spadkiem zawartości tlenu w spalinach w wyniku dostarczonego paliwa w postaci odpadu, z powodu którego następuje również wysoka emisja tlenku węgla oraz wzrost temperatury spalin. Wysokość emisji tlenku węgla oraz czas utrzymywania się wartości tlenu na niższym poziomie zależny był od masy doprowadzonych odpadów oraz mocy, z jaką pracował kocioł. Cztery okres przedstawia powrót mierzonych wartości do poziomu przed otwarciem drzwi.

Następuje to w wyniku wypalania się dostarczonego do paleniska odpadu. Z kolei końcowa wartość temperatury spalin zależna jest od aktualnej zmiany cyklu pracy kotła.

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów.

Na rysunku 6.123 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach, w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 10,98 %, dla 66 % mocy ok. 13,17 % i dla 33 % mocy ok. 14,68 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 5,90 % do poziomu 16,89 % dla 20 kW, o 4,61 % do poziomu 17,78 % dla 13 kW oraz o 2,70 % do poziomu 17,37 % dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem pierwszej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny spadek wartości tlenu o 14,77 % do poziomu 2,11 % podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, o 12,86 % do wartości 4,92 % przy mocy wynoszącej 13 kW oraz o 8,68 % do poziomu 8,69 % w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 10,59 %, dla 13 kW wyniosła 12,78 % oraz dla poziomu 75 kW mocy 13,37 %. Na rysunku 6.124 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenku węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenku węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 534 ppm, dla 66 % mocy ok. 1090 ppm, i dla 33 % mocy ok. 1109 ppm. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek zawartości tlenku węgla o 60 ppm do poziomu 474 ppm dla 20 kW, o 389 ppm do poziomu 701 ppm dla 13 kW oraz o 349 ppm do poziomu 760 ppm dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem pierwszej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok zawartości tlenku węgla do poziomu 4362 ppm podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do wartości 3520 ppm przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do poziomu 3560 ppm w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenku węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 509 ppm, dla 13 kW wyniosła 1108 ppm oraz dla poziomu 7 kW mocy 694 ppm. Na rysunku 6.125 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 303 °C, dla 66 % mocy 298 °C, i dla 33 % mocy 269 °C. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek temperatury spalin o 7 °C do 296 °C dla 20 kW, o 6 °C do 292 °C dla 13 kW oraz o 4 °C do 266 °C dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem pierwszej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił wzrost temperatury spalin do 308 °C podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do 313 °C przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do 308 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie wartości temperatur spalin utrzymywała się na podobnych poziomach.

W tabeli 6.10 (załącznik nr 2) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska pierwszej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.123 do 6.125. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą.



Rys. 6.123. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

Rys. 6.124. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

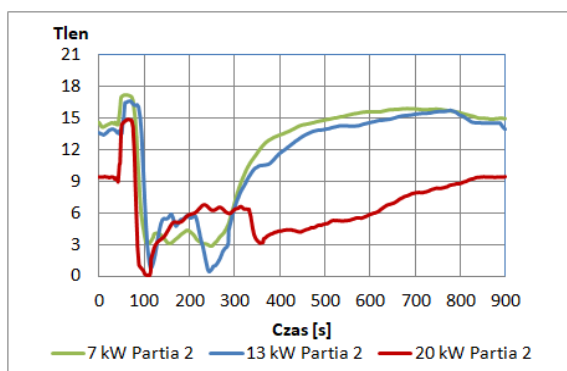
Rys. 6.125. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów.

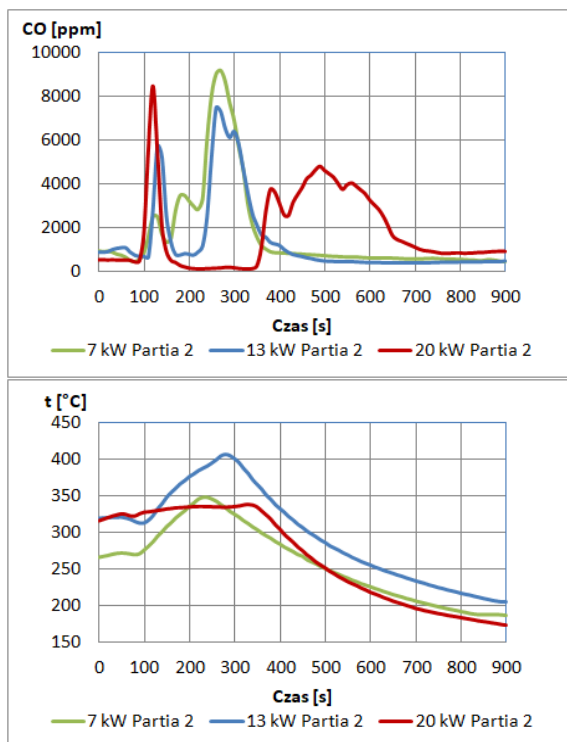
Na rysunku 6.126 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 8,90 %, dla 66 % mocy ok. 13,58 % i dla 33 % mocy ok. 14,37 %. W drugim okresie w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 5,97 % do poziomu 14,87 % dla 20 kW, o 3,10 % do poziomu 16,68 % dla 13 kW oraz o 2,81 % do poziomu 17,18 % dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem drugiej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny spadek wartości tlenu o 14,83 % do poziomu 0,04 % podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, o 16,48 % do wartości 0,20 % przy mocy wynoszącej 13 kW oraz o 14,57 % do poziomu 2,61 % w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W wyniku wypalenia się części odpadu wartość tlenu chwilowo wzrosła w przypadku pracy kotła na mocach 20 kW do 7,01 % oraz 13 kW do 6,02 %. Następnie wraz z zapaleniem się kolejnych części niejednorodnego odpadu w postaci obuwia jego

wartość spadła do 3,01 % dla 20 kW oraz 0,20 % dla 13 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła ona poziom 9,29 %, dla 13 kW wyniosła 14,47 % oraz dla poziomu 7 kW mocy 14,97 %. Na rysunku 6.127 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenu węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła drugiej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenu węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 532 ppm, dla 66 % mocy ok. 963 ppm, i dla 33 % mocy ok. 891 ppm. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 97 ppm do poziomu 435 ppm dla 20 kW, o 283 ppm do poziomu 680 ppm dla 13 kW oraz o 411 ppm do poziomu 480 ppm dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem drugiej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych w pierwszym momencie nastąpił gwałtowny skok zawartości tlenu węgla do poziomu 8063 ppm podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do wartości 5027 ppm przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do poziomu 2993 ppm w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. Wartości tlenu węgla po wypaleniu się łatwopalnej części odpadu chwilowo spadły. Następnie wraz z zapaleniem się kolejnych części niejednorodnego odpadu w postaci obuwia nastąpił wzrost zawartości tlenu węgla do poziomów kolejno 3759 ppm dla 20 kW, 7475 ppm dla 13 kW oraz 9164 ppm dla mocy 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 921 ppm, dla 13 kW wyniosła 474 ppm oraz dla poziomu 7 kW mocy 482 ppm. Na rysunku 6.128 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła pierwszej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 326 °C, dla 66 % mocy 321 °C, i dla 33 % mocy 273 °C. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek temperatury spalin o 3 °C do 323 °C dla 20 kW, o 8 °C do 313 °C dla 13 kW oraz o 6 °C do 267 °C dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem drugiej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych, nastąpił wzrost temperatury spalin do 339 °C podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do 406 °C przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do 349 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 20 kW do 175 °C, dla 13 kW do 206 °C oraz dla poziomu mocy 7 kW do 188 °C.

W tabeli 6.11 (załącznik nr 2) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska drugiej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.126 do 6.128. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne wartości przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą.



Rys. 6.126. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW



Rys. 6.127. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

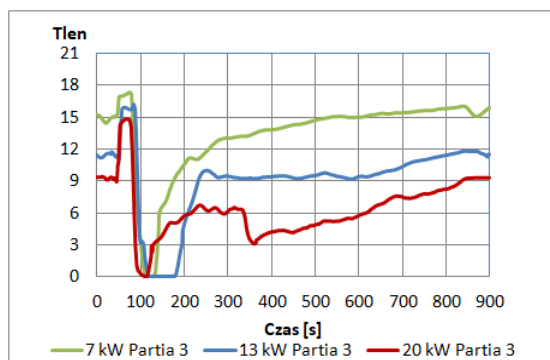
Rys. 6.128. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów.

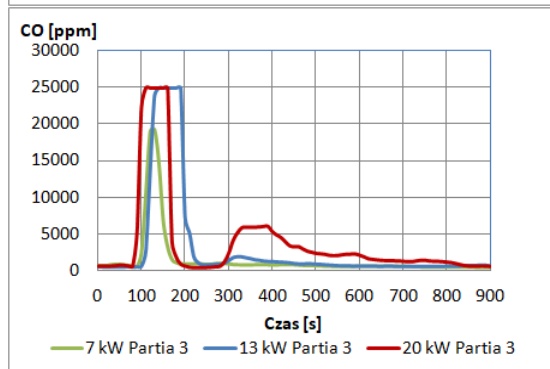
Na rysunku 6.129 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 10,29 %, dla 66 % mocy ok. 12,67 % i dla 33 % mocy ok. 13,78 %. W drugim okresie, w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 5,48 % do poziomu 15,77 % dla 20 kW, o 5,01 % do poziomu 17,69 % dla 13 kW oraz o 3,20 % do poziomu 16,98 % dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem trzeciej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 15,74 % do poziomu 0,03 % podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, o 17,65 % do wartości 0,03 % przy mocy wynoszącej 13 kW oraz o 16,95 % do poziomu 0,03 % w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 6,62 %, dla 13 kW wyniosła 12,68 % oraz dla poziomu 7 kW mocy 14,58 %. Na rysunku 6.130 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenku węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenku węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 515 ppm, dla 66 % mocy ok. 696 ppm, i dla 33 % mocy ok. 803 ppm. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek zawartości tlenku węgla o 37 ppm do poziomu 478 ppm dla 20 kW, o 128 ppm do poziomu 568 ppm dla 13 kW oraz o 107 ppm do poziomu 696 ppm dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru wraz z doprowadzeniem trzeciej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenku węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 15 oraz 13 kW poziom tlenu węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas ok. 60s. W przypadku pracy kotła na poziomie 7 kW wartość tlenku węgla wzrosła do poziomu 19301 ppm. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenku węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła ona poziom 2106 ppm, dla 13 kW wyniosła 647 ppm oraz dla poziomu 7 kW mocy 633 ppm. Na rysunku 6.131

zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła trzeciej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 307 °C, dla 66 % mocy 308 °C, i dla 33 % mocy 269 °C. W drugim okresie w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów nastąpił spadek temperatury spalin o 2 °C do 306 °C dla 20 kW, o 3 °C do 305 °C dla 13 kW oraz o 5 °C do 264 °C dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem trzeciej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych, nastąpił wzrost temperatury spalin do 343 °C podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do 370 °C przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do 372 °C w przypadku kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 20 kW do 204 °C, dla 13 kW do 205 °C oraz dla poziomu mocy 7 kW do 219 °C.

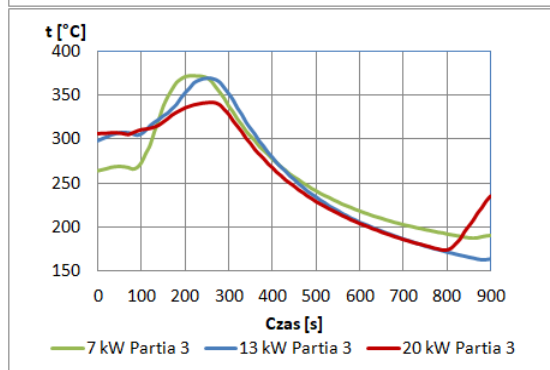
W tabeli 6.12 (załącznik nr 2) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska trzeciej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.129 do 6.131. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenku węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.129. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW



Rys. 6.130. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

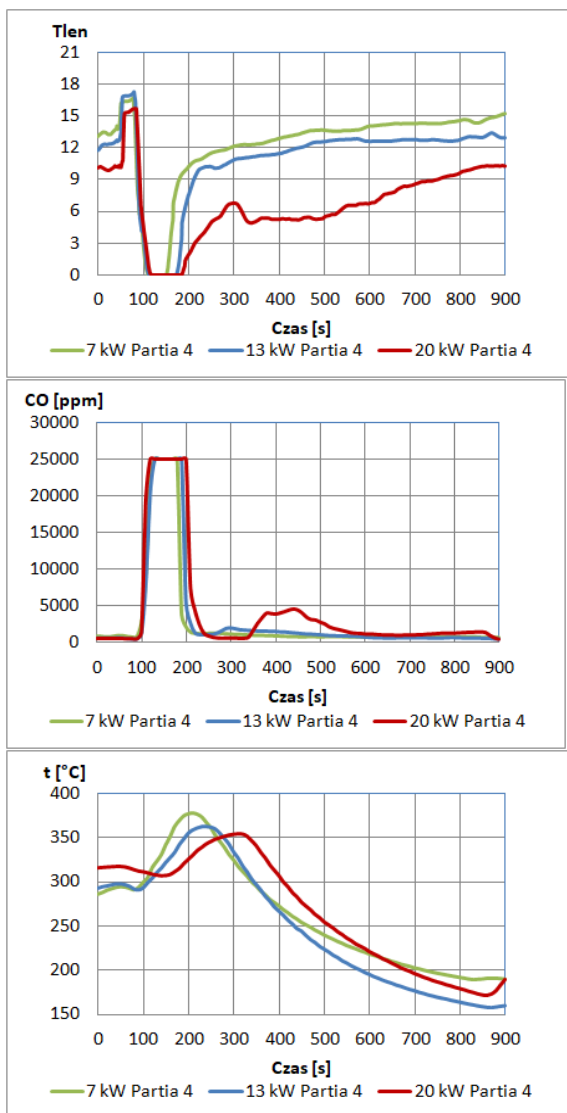


Rys. 6.131. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów.

Na rysunku 6.132 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 10,19 %, dla 66 % mocy ok. 13,69 % i dla 33 % mocy ok. 17,08 %. W drugim okresie, w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 5,80 % do poziomu 15,99 % dla 20 kW, o 3,78 % do poziomu 17,48 % dla 13 kW oraz o 1,89 % do poziomu 18,98 % dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem czwartej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 15,96 % do poziomu 0,03 % podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, o 17,44 % do wartości 0,03 % przy mocy wynoszącej 13 kW oraz o 18,66 % do poziomu 0,31 % w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 11,59 %, dla 13 kW wyniosła 15,38 % oraz dla poziomu 7 kW mocy 14,98 %. Na rysunku 6.133 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenu węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenu węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 1128 ppm, dla 66 % mocy ok. 891 ppm, i dla 33 % mocy ok. 795 ppm. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 572 ppm do poziomu 556 ppm dla 20 kW, o 418 ppm do poziomu 473 ppm dla 13 kW oraz o 288 ppm do poziomu 507 ppm dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem czwartej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenu węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 15, 10 oraz 7 kW poziom tlenu węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas kolejno ok. 90 s, 70 s oraz 60 s. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła ona poziom 1137 ppm, dla 13 kW wyniosła 811 ppm oraz dla poziomu 7 kW mocy 704 ppm. Na rysunku 6.134 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła czwartej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 318 °C, dla 66 % mocy 298 °C, i dla 33 % mocy 295 °C. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek temperatury spalin o 11 °C do 307 °C dla 20 kW, o 7 °C do 291 °C dla 13 kW oraz o 8 °C do 286 °C dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem czwartej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił wzrost temperatury spalin do 355 °C podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do 363 °C przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do 378 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 20 kW do 221 °C, dla 13 kW do 195 °C oraz dla poziomu mocy 7 kW do 218 °C.

W tabeli 6.13 (załącznik nr 2) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska czwartej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.132 do 6.134. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenu węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.132. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

Rys. 6.133. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

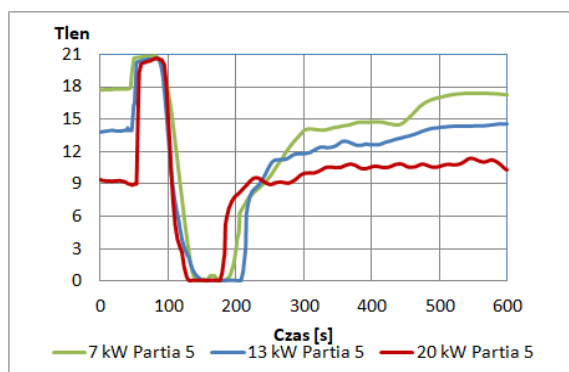
Rys. 6.134. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów.

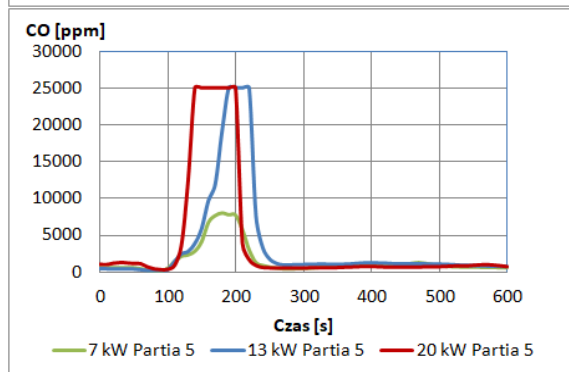
Na rysunku 6.135 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 9,08 %, dla 66 % mocy ok. 13,98 % i dla 33 % mocy ok. 17,88 %. W drugim okresie, w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 11,70 % do poziomu 20,78 % dla 20 kW, o 6,80 % do poziomu 20,78 % dla 13 kW oraz o 3,01 % do poziomu 20,89 % dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem piątej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 20,75 % do poziomu 0,03 % podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, o 20,75 % do wartości 0,03 % przy mocy wynoszącej 13 kW oraz o 20,85 % do poziomu 0,03 % w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 10,69 %, dla 13 kW wyniosła 15,57 % oraz dla poziomu 7 kW mocy 16,37 %. Na rysunku 6.136 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenku węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenku węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 1091 ppm, dla 66 % mocy ok. 376 ppm, i dla 33 % mocy

ok. 580 ppm. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 839 ppm do poziomu 252 ppm dla 20 kW, o 229 ppm do poziomu 147 ppm dla 13 kW oraz o 420 ppm do poziomu 160 ppm dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem piątej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenu węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 20 oraz 13 kW poziom tlenu węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas kolejno ok. 70 s i 40 s. W przypadku pracy kotła na poziomie 7 kW wartość tlenu węgla wzrosła do poziomu 7997 ppm. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła ona poziom 663 ppm, dla 13 kW wyniosła 700 ppm oraz dla poziomu 7 kW mocy 593 ppm. Na rysunku 6.137 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła piątej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 237 °C, dla 66 % mocy 208 °C, i dla 33 % mocy 295 °C. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek temperatury spalin o 48 °C do 189 °C dla 20 kW, o 26 °C do 182 °C dla 13 kW oraz o 8 °C do 286 °C dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem piątej porcji odpadu i zamknięciu drzwiczek wyczystkowych, nastąpił wzrost temperatury spalin do 306 °C podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do 353 °C przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do 378 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 20 kW do 306 °C, dla 13 kW do 256 °C oraz dla poziomu mocy 7 kW do 218 °C.

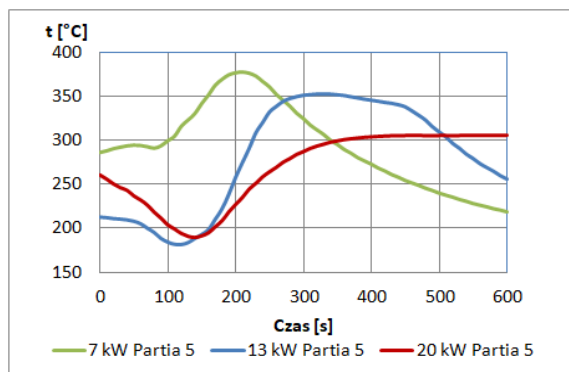
W tabeli 6.14 (załącznik nr 2) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska piątej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.135 do 6.137. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenu węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.135. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW



Rys. 6.136. Zawartość tlenu węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

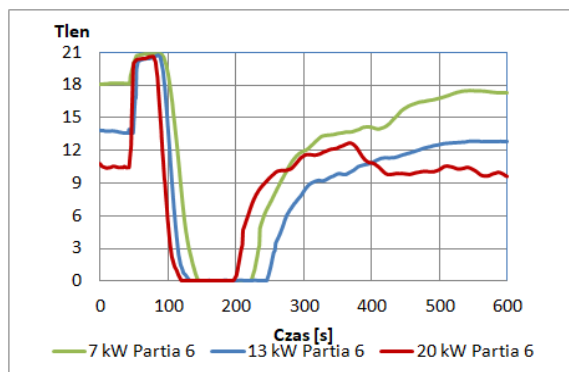


Rys. 6.137. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

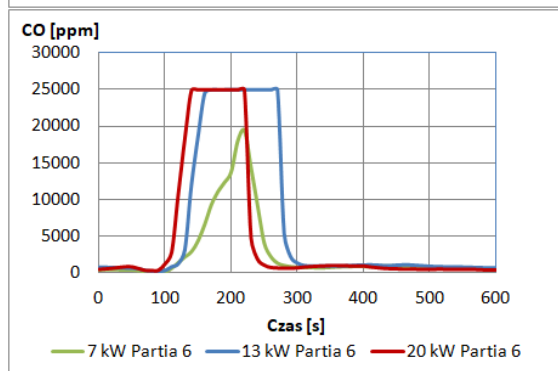
Zestawienie wyników badań kotła podczas pracy po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów.

Na rysunku 6.138 zestawiono wykresy przedstawiające różnice zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu. Wartość początkowa zawartości tlenu wynosiła dla 100 % mocy ok. 10,39 %, dla 66 % mocy ok. 13,58 % i dla 33 % mocy ok. 18,17 %. W drugim okresie, w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomu zawartości tlenu o 10,19 % do poziomu 20,58 % dla 20 kW, o 7,30 % do poziomu 20,88 % dla 13 kW oraz o 2,72 % do poziomu 20,89 % dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem szóstej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu o 20,85 % do poziomu 0,03 % podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, o 20,85 % do wartości 0,03 % przy mocy wynoszącej 13 kW oraz o 20,54 % do poziomu 0,03 % w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła poziom 10,00 %, dla 13 kW wyniosła 12,78 % oraz dla poziomu 7 kW mocy 15,77 %. Na rysunku 6.139 zestawiono wykresy przedstawiające zmiany w czasie zawartości tlenu węgla w spalinach w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu. Średnia wartość początkowa zawartości tlenu węgla wynosiła dla 100 % mocy ok. 594 ppm, dla 66 % mocy ok. 705 ppm, i dla 33 % mocy ok. 439 ppm. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek zawartości tlenu węgla o 367 ppm do poziomu 227 ppm dla 20 kW, o 489 ppm do poziomu 216 ppm dla 13 kW oraz o 309 ppm do poziomu 130 ppm dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem szóstej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił gwałtowny skok poziomów zawartości tlenu węgla. Podczas pracy kotła na poziomach mocy 20 oraz 13 kW poziom tlenu węgla przekroczył górną granicę możliwości pomiarowych analizatora spalin w wysokości 25000 ppm na czas kolejno ok. 80 s i 110 s. W przypadku pracy kotła na poziomie 7 kW wartość tlenu węgla wzrosła do poziomu 19365 ppm. W kolejnym czwartym okresie nastąpił powrót zawartości tlenu węgla w spalinach do wartości charakterystycznych dla określonych mocy kotła. W przypadku mocy 20 kW osiągnęła ona poziom 311 ppm, dla 13 kW wyniosła 693 ppm oraz dla poziomu 7 kW mocy 586 ppm. Na rysunku 6.140 zaprezentowano przebieg zmian w czasie temperatury spalin w zależności od obciążenia pracy kotła na skutek doprowadzenia do paleniska kotła szóstej partii odpadu. Wartość temperatury spalin przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych wynosiła dla 100 % mocy 290 °C, dla 66 % mocy 229 °C, i dla 33 % mocy 138 °C. W drugim okresie, w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych w pięćdziesiątej sekundzie pomiarów, nastąpił spadek temperatury spalin o 62 °C do 228 °C dla 20 kW, o 29 °C do 200 °C dla 13 kW oraz o 13 °C do 125 °C dla pracy kotła przy mocy 7 kW. W trzecim okresie pomiaru, wraz z doprowadzeniem szóstej porcji odpadu i zamknięciem drzwiczek wyczystkowych, nastąpił wzrost temperatury spalin do 301 °C podczas pracy kotła przy mocy 20 kW, do 373 °C przy mocy wynoszącej 13 kW oraz do 318 °C w przypadku mocy kotła na poziomie 7 kW. W kolejnym czwartym okresie nastąpił spadek temperatury spalin w przypadku mocy 20 kW do 319 °C, dla 13 kW do 280 °C oraz dla poziomu mocy 7 kW do 238 °C.

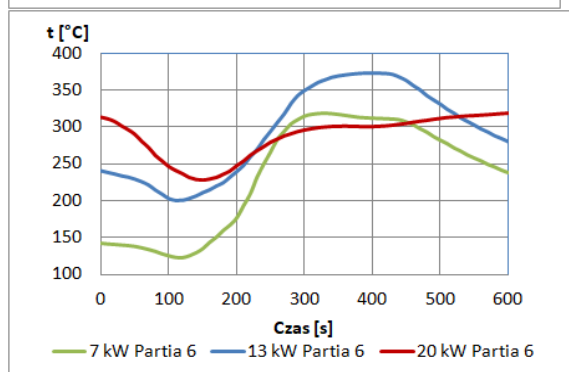
W tabeli 6.15 (załącznik nr 2) przedstawiono zestawienie wyników zmian zawartości tlenu i tlenku węgla w spalinach oraz ich temperatury w wyniku doprowadzenia do paleniska szóstej partii odpadów przedstawionych na rysunkach od 6.138 do 6.140. Pierwsza kolumna zawiera informację o mocy, z jaką pracował kocioł. Kolejne kolumny przedstawiają wyniki badań w następujących po sobie okresach pomiarów. W dwóch ostatnich kolumnach przedstawiono czas utrzymywania się badanej wartości poza poziomem charakteryzującym pracę kotła z ustaloną mocą. Dodatkowo w ostatniej kolumnie przedstawiono czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskim zera oraz tlenku węgla powyżej górnej granicy pomiarowej analizatora.



Rys. 6.138. Zawartość tlenu w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW



Rys. 6.140. Zawartość tlenku węgla w spalinach po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW



Rys. 6.9.18. Pomiar temperatury spalin po doprowadzeniu do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła na trzech poziomach mocy 7, 13 oraz 20 kW

6.4. Ocena efektów pracy kotłów różnych producentów (zestawienie wyników badań obu kotłów)

W tabeli 6.16 przedstawiono zestawienie granicznych wartości badanych parametrów otrzymanych podczas prawidłowej i nieprawidłowej eksploatacji obu kotłów. Badania zostały przeprowadzone podczas pracy kotłów na poziomie 33 %, 66 % oraz 100 % mocy znamionowej. W przypadku kotła Heiztechnik Q EKO 15 były to moce 5 kW, 10 kW oraz 15 kW, a w przypadku kotła Tilgner EKR 20 kolejno 7 kW, 13 kW oraz 20 kW. Jako przykłady obrazujące nieprawidłową pracę kotłów, w tabeli przedstawiono zakresy wyników uzyskanych podczas współpalania pierwszej partii odpadu o masie 65 g w postaci butelki plastikowej, trzeciej partii odpadów o masie 300 g w formie mieszanki

odpadów oraz czwartej partii odpadów o masie 600 g, również w formie mieszanki odpadów komunalnych.

Tab. 6.16. Zestawienie wyników badań kotłów grzewczych

Kocioł	Rodzaj eksploatacji	Moc [kW]	Temperatura spalin [°C]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	
Heiztechnik Q EKO 15	prawidłowa	5	118 ÷ 238	651 ÷ 1573	11,59 ÷ 17,48	
		10	161 ÷ 258	292 ÷ 1370	10,99 ÷ 15,48	
		15	206 ÷ 280	209 ÷ 795	9,40 ÷ 14,78	
	nieprawidłowa	I partia odpadu	5	215 ÷ 265	1112 ÷ 6154	8,40 ÷ 17,98
			10	286 ÷ 337	316 ÷ 13805	3,92 ÷ 17,89
			15	381 ÷ 411	763 ÷ 11216	3,11 ÷ 15,99
		III partia odpadu	5	173 ÷ 321	517 ÷ 17733	0,04 ÷ 18,87
			10	222 ÷ 389	223 ÷ 25000	0,04 ÷ 16,68
			15	304 ÷ 452	212 ÷ 25000	0,03 ÷ 15,38
		IV partia odpadu	5	192 ÷ 363	507 ÷ 15537	0,31 ÷ 18,98
			10	227 ÷ 413	473 ÷ 25000	0,03 ÷ 17,48
			15	295 ÷ 458	447 ÷ 25000	0,03 ÷ 15,99
Tilgner EKR 20	prawidłowa	7	132 ÷ 307	420 ÷ 1071	12,46 ÷ 16,58	
		13	131 ÷ 318	354 ÷ 1640	6,61 ÷ 13,69	
		20	175 ÷ 300	154 ÷ 2551	6,81 ÷ 12,37	
	nieprawidłowa	I partia odpadu	7	266 ÷ 315	541 ÷ 3560	8,69 ÷ 17,37
			13	287 ÷ 314	701 ÷ 3520	4,92 ÷ 17,78
			20	296 ÷ 309	474 ÷ 4362	2,11 ÷ 16,89
		III partia odpadu	7	188 ÷ 372	471 ÷ 19301	0,03 ÷ 17,37
			13	162 ÷ 370	531 ÷ 25000	0,03 ÷ 16,89
			20	174 ÷ 343	380 ÷ 25000	0,04 ÷ 14,78
		IV partia odpadu	7	188 ÷ 349	480 ÷ 9164	0,03 ÷ 16,98
			13	206 ÷ 406	384 ÷ 7475	0,03 ÷ 17,69
			20	175 ÷ 339	119 ÷ 8498	0,03 ÷ 15,77

W dalszej części, w celu dokładniejszej analizy, porównane zostaną przebiegi zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach na skutek:

- otwarcia drzwiczek wyczystkowych podczas pracy kotłów na poziomie 33 % mocy znamionowej (rys. 6.7 – 6.8 oraz rys. 6.77 – 6.78),
- doprowadzenia do paleniska pierwszej partii odpadu podczas pracy kotłów na poziomie 66 % mocy znamionowej (rys. 6.27 – 6.28 oraz rys. 6.95 – 6.96),
- doprowadzenia do paleniska trzeciej partii odpadu podczas pracy kotłów na poziomie 100 % mocy znamionowej (rys. 6.49 – 6.50 oraz rys. 6.115 – 6.116),
- doprowadzenia do paleniska czwartej partii odpadu podczas pracy kotłów na poziomie 100 % mocy znamionowej (rys. 6.51 – 6.52 oraz rys. 6.117 – 6.118).

W każdym z czterech przypadków przedstawiony zostanie moment przekroczenia zakresu zawartości tlenu w spalinach otrzymanego podczas badania prawidłowej eksploatacji kotłów. Wartości te przedstawione zostały w tabeli 6.16.

W pierwszym przypadku zawartość tlenu w spalinach w obu kotłach na początku pomiaru utrzymywała się na podobnym poziomie wynoszącym ok. 15 %. Następnie w 50 s pomiaru wskutek otwarcia drzwiczek wyczystkowych poziom tlenu gwałtownie wzrósł. W kotle Heiztechnik do 17,98 %, a w kotle Tilgner do 16,99 %. W obu kotłach zawartość tlenu przekroczyła górną graniczną wartość, uzyskaną podczas prawidłowej eksploatacji kotłów. Po okresie 30 s w wyniku zamknięcia drzwiczek wyczystkowych poziomy tlenu w spalinach wróciły do wartości przed otwarciem drzwiczek. W trzech kolejnych przypadkach przebieg zmian w czasie zawartości tlenu w spalinach wskutek otwarcia drzwiczek wyczystkowych do 80 s pomiaru będą analogiczne dla obu kotłów.

Drugi przypadek przedstawia reakcję zawartości tlenu w spalinach na doprowadzenie do paleniska pierwszej partii odpadu w postaci butelki plastikowej o masie 65 g. Do 50 s pomiaru poziom tlenu w spalinach obu kotłów utrzymywał się w granicznych wartościach uzyskanych podczas prawidłowej eksploatacji. Następnie po otwarciu drzwi zaobserwowano przekroczeni górnej granicy wartości tlenu

do poziomu 17,89 % w kotle Heiztechnik oraz do 17,78 % w kotle Tilgner. Po doprowadzeniu do paleniska pierwszej partii odpadów oraz zamknięciu drzwi wyczystkowych w 80s pomiaru zawartość tlenu w spalinach gwałtownie spadła do 3,92 % w kotle Heiztechnik oraz do 4,92 % w kotle Tilgner, przekraczając dolne graniczne wartości otrzymane podczas prawidłowej eksploatacji. Następnie w wyniku gwałtownego spalenia się niewielkiej masy odpadu poziomy tlenu w spalinach obu kotłów powróciły do wartości sprzed otwarcia drzwiczek wyczystkowych. W wyniku wyższej o 3 kW mocy, z jaką pracował kocioł Tilgner, czas powrotu do początkowych wartości był odrobinę gwałtowniejszy, niż w kotle Heiztechnik. Trzeci oraz czwarty przypadek opisuje zmianę zawartości tlenu w spalinach na doprowadzenie do paleniska trzeciej i czwartej partii odpadu w postaci mieszaniny odpadu komunalnego o masach 300 g i 600 g. W obu przypadkach kotły pracowały z mocą znamionową. W trzecim przypadku zawartość tlenu w obu kotłach przed otwarciem drzwiczek wyczystkowych utrzymywała się na podobnym poziomie ok. 9 %. Następnie w 50 s pomiaru, wskutek otwarcia drzwiczek wyczystkowych, poziom tlenu w spalinach gwałtownie wzrósł w kotle Heiztechnik do 15,38 %, a w kotle Tilgner do 14,87 %. W obu kotłach poziom tlenu przekroczył górną graniczną wartość uzyskaną podczas prawidłowej eksploatacji kotłów. Następnie wskutek doprowadzenia do paleniska trzeciej partii odpadu w obu kotłach nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu w spalinach do poziomów bliskich zeru. Okres utrzymywania się zawartości tlenu na tym poziomie został przedstawiony w tabelach 6.6 oraz 6.12. Dla kotła Heiztechnik wynosił 82 s, a dla kotła Tilgner 31 s. Różnice te wynikają z różnych mocy, z jakimi pracowały kotły. W czwartym przypadku proces zmian poziomu tlenu w spalinach był analogiczny do przypadku trzeciego w obu kotłach. Kluczową różnicą był czas utrzymywania się zawartości tlenu w spalinach na poziomie bliskim zeru przedstawiony w tabelach 6.7 oraz 6.13. W przypadku obu kotłów okres ten był ok. dwa razy dłuższy i wynosił dla kotła Heiztechnik 163 s oraz dla kotła Tilgner 80 s. Wynikało to z dwa razy większej masy mieszanki odpadu komunalnego. W dalszym okresie w przypadku trzecim i czwartym następował powrót zawartości tlenu w spalinach do poziomu sprzed otwarcia drzwiczek wyczystkowych. Czas powrotu zależny był od mocy, z jaką pracowały kotły.

Analogiczne wykresy przedstawiające zmianę w czasie zawartości tlenu w spalinach na skutek doprowadzenia odpadów dla kotła Heiztechnik EKO 15 oraz Tilgner EKR 20 świadczą, że ten sam efekt będzie obserwowalny w różnych typach kotłów z automatycznym podajnikiem paliwa. Daje to podstawę do opracowania narzędzia umożliwiającego osobie kontrolującej określić nieprawidłową eksploatację kotłów grzewczych.

7. Podsumowanie

W pracy pod tytułem: „Analiza przyczyn nieprawidłowej eksploatacji kotłów wodnych” skupiono się na problemie współspalania odpadów komunalnych przez użytkowników kotłów małej mocy w gospodarstwach domowych i wpływie tej eksploatacji na środowisko naturalne. Kotły małej mocy na paliwa stałe stanowią w Polsce intensywnie rozwijający się sektor odpowiedzialny za produkcję energii cieplnej do celów grzewczych w gospodarstwach domowych. Dodatkowo narastający kryzys energetyczny w ostatnim roku, wzrost cen nośników energii, spowodował szybki powrót do konwencjonalnych źródeł energii, rozumianych jako sposobu zaspokojenia potrzeb grzewczych. Spowodowało to zwiększenie zużycia tańszych nośników energii, jakimi są paliwa kopalne, przynależące do źródeł nieodnawialnych. Kryzys ten nie jest podyktowany w kraju, jak i w Europie brakiem światowych źródeł surowca w postaci węgla, ale zakłóceniem jego dostaw. Zakłócenie wypracowanego przed laty systemu redystrybucji paliw wpłynęło na zmiany w systemach logistycznych odpowiedzialnych za dostarczanie pierwotnych źródeł energii do odbiorców. W konsekwencji występuje lokalny i czasowy deficyt paliw stałych na rynku paliwowym lub lokalny i czasowy wzrost cen. Strategia długoterminowa polegać ma na zapewnieniu stabilnych dostaw producentom z branży energetyki zawodowej dostarczających energię do odbiorców przemysłowych, w tym elektrowni i elektrociepłowni. Skutkiem tego ogranicza się ilość paliwa dostępnego dla gospodarstw domowych. Powodować to może próbę wykorzystania odpadów komunalnych jako paliwa dodatkowego w procesach współspalania. Obok spalania złej jakości paliw spalanie lub współspalanie odpadów komunalnych jest podstawowym powodem odpowiedzialnym za wysoką emisję zanieczyszczeń w sektorze komunalnym. Szacuje się, że w Polsce każdego roku ok. 200 kg odpadów komunalnych na osobę spalanych jest w domowych urządzeniach grzewczych lub wyrzucanych, np. do lasów, niezgodnie z przepisami ustawy o odpadach. Według raportu Światowej Organizacji Zdrowia WHO okazuje się, że Polska ma najgorszą jakość powietrza spośród wszystkich krajów Unii Europejskiej, co ma związek z małą wykrywalnością nielegalnego spalania odpadów oraz nieskutecznością przeprowadzanych kontroli. Konieczne jest opracowanie nowej skuteczniejszej metody identyfikacji niewłaściwej eksploatacji kotłów małej mocy. W celu realizacji tego zadania sformułowana została teza badawcza:

Możliwe jest opracowanie procedury pozwalającej na identyfikację niewłaściwej eksploatacji kotła na paliwo stałe opartą o analizę zawartości tlenu w emitowanych spalinach?

W celu uzyskania potwierdzenia słuszności stawianej tezy oraz w sytuacji braku opracowań w literaturze naukowej dotyczących empirycznych badań spalania odpadów komunalnych w rzeczywistych kotłach małej mocy przeprowadzony został cykl badań. Zrealizowane prace badawcze zostały podzielone na pięć głównych zdań. Pierwszym było wytypowanie do badań odpowiednich modeli kotłów na paliwa stałe adekwatnych do stosowanych powszechnie w gospodarstwach domowych. Badania przeprowadzono na dwóch popularnych modelach kotłów na paliwo stałe, są to: kocioł produkowany przez firmę Heiztechnik o nazwie modelu Q EKO 15 posiadający moc znamionową na poziomie 15 kW oraz kocioł produkowany przez firmę Tilgner o nazwie modelu EKR 20 z mocą znamionową 20 kW. Drugim zadaniem było zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego przeprowadzenie badań. W tym celu specjalnie zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe, mieszczące się na terenie Politechniki Poznańskiej w laboratorium Konwersji Energii w Instytucie Energetyki Ciepłej. Stanowisko pomiarowe zaprojektowane zostało zgodnie z wymogami normatywnymi, obowiązującymi w Unii Europejskiej, dotyczącymi badania kotłów wodnych niskotemperaturowych, opalanych paliwami stałymi. Umożliwiało to wykonanie badań kotłów grzewczych obejmujących wyznaczenie: mocy, składu i ilości emitowanych spalin przy ciągłej kontroli dostarczanego paliwa lub mieszanin paliw. Głównym elementem badawczym stanowiska badawczego był tor pomiarowy będący projektem autorskim. System pomiarowy umożliwiał rejestrację wszystkich wytypowanych wielkości pomiarowych przedstawiony na rysunku 4.2 w rozdziale czwartym niezbędnych do oceny efektów pracy kotłów. Trzecim celem zaplanowanych prac badawczych było wytypowanie oraz przeprowadzenie badań chemicznych i technicznych paliwa wzorcowego (zalecanego przez producenta kotła) oraz odpadów komunalnych służących jako paliwo w przeprowadzonych badaniach

symulujących niewłaściwą eksploatację. Paliwem wzorcowym wykorzystanym w badaniach był zalecony przez producenta węgiel sortowany, tzw. eko-groszek, którego specyfikacja podana i przedstawiona została w tabeli 5.2 w rozdziale piątym. Na podstawie analizy literatury dotyczącej odpadów komunalnych, przedstawionej w rozdziale pierwszym, wybrano sześć partii selekcyonowanych odpadów komunalnych o określonej masie przedstawionych w tabeli 5.1 w rozdziale piątym. Wykonano szczegółową analizę mieszaniny odpadu komunalnego, pobranego ze składowiska odpadów miejskich. Określony został jego skład oraz wykonano analizę techniczną zgodną z obowiązującymi normami dla paliw stałych. Otrzymane wyniki badań przedstawione zostały w tabelach 6.2 oraz 6.3 w rozdziale szóstym. Główną obserwacją, wynikającą z analizy mieszaniny odpadu komunalnego, było stwierdzenie jego wysokiej wartości ciepła spalania wynoszące 32,1 MJ/kg porównywalne z wartościami ciepła spalania wysokiej jakości węgla kamiennego. Ostatnim zadaniem było przeprowadzenie wieloetapowych badań na zbudowanym stanowisku pomiarowym, podczas których rejestrowano następujące parametry:

- temperatury wody wylotowej (wypływającej) z kotła T_1 [°C],
- temperatury wody powrotnej (dopływającej) do kotła T_2 [°C],
- temperatury wody na wejściu do wymiennika ciepła schładzającego wodę obiegową kotła T_3 [°C],
- temperatury wody na wyjściu z wymiennika ciepła schładzającego wodę obiegową kotła T_4 [°C],
- temperatury spalin T_{spal} [°C],
- zawartości tlenu węgla w spalinach CO [ppm],
- zawartości tlenu w spalinach O_2 [%].

W pierwszym etapie badań w kotłach wykorzystano zalecane przez producenta paliwa w postaci eko-groszku. Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano punkty odniesienia w postaci granicznych wartości badanych parametrów podczas prawidłowej eksploatacji kotłów. W drugim etapie badań przeprowadzony został eksperyment symulujący niewłaściwą eksploatację kotłów. Podczas badań monitorowano zawartość tlenu w spalinach, zestawiając ją ze zmianą zawartości tlenu węgla oraz temperaturą spalin. W tablicach od 6.4 do 6.15 w rozdziale szóstym przedstawiono charakterystyczne cztery okresy zmienności temperatury, zawartości tlenu i tlenu węgla w spalinach. W pierwszym okresie poziomu tlenu, tlenu węgla oraz temperatury spalin mieściły się w wartościach granicznych, otrzymanych podczas prawidłowej eksploatacji kotłów z zadaniem obciążeniem. Drugi okres obejmuje zmianę mierzonych wartości powstałą w wyniku otwarcia drzwiczek wyczystkowych podczas doprowadzenia odpadu. Charakteryzował się on gwałtownym wzrostem wartości tlenu oraz spadkiem temperatury i zawartości tlenu węgla w spalinach. Trzeci okres rozpoczął się po zamknięciu drzwiczek wyczystkowych do paleniska. Cechował się on gwałtownym spadkiem zawartości tlenu w spalinach, wzrostem emisji tlenu węgla oraz temperatury spalin. Wartość emisji tlenu węgla oraz czas utrzymywania się wartości tlenu na niższym poziomie zależny był od masy doprowadzonych odpadów oraz mocy, z jaką pracowały oba kotły. Końcowy okres przedstawia powrót mierzonych wartości do poziomu sprzed otwarcia drzwiczek wyczystkowych.

Uzyskane dane nie tylko wskazują na zagrożenia płynące ze spalania odpadów pochodzących z gospodarstw domowych, ale co najistotniejsze, potwierdzają tezę, że możliwa jest budowa systemu pozwalającego na identyfikację niewłaściwej eksploatacji kotła na paliwo stałe, opartego na analizie zawartości tlenu w emitowanych spalinach. Umożliwiłoby to np. na zdalny nadzór nad pracującymi kotłami. Nadzór ten prowadzony zdalnie nie wymuszałby ingerencji organów kontrolnych w budynkach mieszkalnych i przemysłowych. Dałoby to nowe narzędzie w walce ze smogiem i innymi zanieczyszczeniami emitowanymi do atmosfery.

W pierwszym eksperymencie analizowano reakcję na chwilowe otwarcie drzwiczek wyczystkowych. W wyniku przeprowadzonych prób zaobserwowano, że nawet niewielka ingerencja użytkownika, jak otwarcie drzwiczek wyczystkowych, może zostać wykryta na podstawie monitoringu zawartości tlenu w spalinach. Obserwuje się nagły wzrost jego wartości do poziomu ok. 18 %. Podobną zależność zaobserwowano w następnych etapach badań. Polegały one na doprowadzeniu do paleniska wcześniej wytypowanych sześciu partii odpadów. Procedura badawcza obejmowała rejestrację wzrostu zawartości tlenu w spalinach w wyniku otwarcia drzwi wyczystkowych w celu doprowadzenia odpadu, następnie obniżenia jego wartości do poziomu bliskiego zero. Zależność ta została

zaobserwowana przy doprowadzeniu każdego z odpadów, nawet tak niewielkiego, jak butelka plastikowa o wadze 65 g. Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru zależny był od masy doprowadzonych odpadów oraz mocy kotła, z jaką pracował. Schemat ten powtórzył się w obu badanych modelach kotłów.

Przedstawione wyniki badań dają podstawy do opracowania metody identyfikacji nieprawidłowej eksploatacji urządzeń grzewczych w warunkach rzeczywistych. Kolejne badania powinny obejmować poszerzenie rodzajów współspalanych odpadów oraz dodatkowo eksperyment powinien zostać poszerzony o badania przeprowadzone na urządzeniach grzewczych, spełniających najnowsze rozwiązania konstrukcyjne kotłów, czyli klasy 5.

Bibliografia

- [1] ADVANTECH, ADAM 4000 Industrial Grade Data Acquisition Modules User's Manual, 2008.
- [2] Altholzverordnung (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz) vom 15 August 2002, BGBl I 2002, 3302.
- [3] Anthony E.J., Bulewicz E.M., Dudek K., Problemy chemiczne utylizacji popiołów z palenisk fluidalnych, TV symposium „Ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery” POL-EMIS '98, Szklarska Poręba, czerwiec 1998.
- [4] Bartok W., Sarofim A.F., Fossil fuel combustion, Wiley, New York 1989.
- [5] Bartoszewicz J., Nygard A., Urbaniak R., Characteristics of fans used in low-power boilers, Journal of Power Technologies, 2017, 97, 1, 69-74.
- [6] Bassey U., Sarquah K., Hartmann M., Tom A., Beck G., Antwi E., Narra S., Nelles M., Thermal treatment options for single-use, multilayered and composite waste plastics in Africa, Energy, 2023, 270, 126872.
- [7] Beer J.M.. Recent trends in coal combustion research, Coal Combustion ed. Junkai Feng, Hemisphere Publishing Corporation, New York 1988.
- [8] Benson S.A., Jones M.L., Harb J.H., Ash formation and deposition, Fundamentals of Coal Combustion. red. L.D. Smoot, Elsevier. New York 1993.
- [9] Benson S.W., Combustion, a chemical and kinetics view, 21st Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1986, 703.
- [10] Bever J., Stein A., Teimann H., Zaawansowane metody oczyszczania ścieków, Przemysł EKO, Bydgoszcz 1997.
- [11] Bień J., Matysiak B., Wystalska K., Stabilizacja i odwadnianie osadów ściekowych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1999.
- [12] Bień J.B., Matysiak B., Bień J.D., Charakterystyki reologiczne osadów ściekowych kondycjonowanych polielektrolitami, Konferencja pt. Osady ściekowe - problem aktualny, Częstochowa-Ustroń 2001, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2001, 30-39.
- [13] Bień J.B., Osady ściekowe, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [14] Bień J.B., Wystalska K., Osady ściekowe, teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011.
- [15] Bogacki M., Przegląd metod i systemów usuwania par rtęci z gazów, Wydawnictwo AGH, Kraków 1997.
- [16] Boruszko D., Przeróbka i unieszkodliwienie osadów ściekowych, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2001.
- [17] Bowman C.T., Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation, 24th Symposium (Int.) of Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh 1992.
- [18] BRAGER, Instrukcja obsługi Analizator Jakości Procesu Spalania BCA-01.
- [19] Brzeski Z., Dioksyny i furany w środowisku i ich wpływ na organizm, Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu, 2011, 17 (3), 161-164.
- [20] Bujak J.W., Heat recovery from thermal treatment of medical waste, Energy, 2015, 90, Part 2, 1721-1732.
- [21] Bujak J.W., Production of waste energy and heat in hospital facilities, Energy, 2015, 91, 350-362.
- [22] Bulewicz E.M., Smog fotochemiczny, III semin. Nauk. „Procesów spalania”, PIS, Radom 1998.
- [23] Bulewicz E.M., Spalanie a ochrona środowiska, Gospodarka cieplna i eksploatacja pieców przemysłowych, Częstochowa 1998.
- [24] Chandran R.R., Duqum J.N., Modrak T.M., Coal classification for fluidized-bed, Coal Combustion ed. Junkai Feng, Hemisphere Publishing Corporation, New York 1988.
- [25] Cheng H., Hu Y., Curbing dioxin emissions from municipal solid waste incineration in China: Re-thinking about management policies and practices, Environmental Pollution, 2010, 158, 9, 2809-2814.

- [26] Cichy W., Prądyński W., The influence of the degree of contamination of wood waste with urea-formaldehyde resins on the emission of gaseous combustion products during burning in low-power boiler. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference – Management of Recovered Wood, Klagenfurt, Austria 2–4 May 2007, 173–184.
- [27] Cichy W., Wróblewska H., Paliwa drzewne z odpadów poużytkowych – potencjał, właściwości, zagrożenia, IV międzynarodowa konferencja pt. „Paliwa z odpadów”, Helion, Gliwice 2003.
- [28] Ciupek B., Judt W., Optymalizacja procesu spalania paliw węglowych w kotłach 100-3000 kW, *Magazyn instalatora* 2018, 3 (235), 44-46.
- [29] Decyzja Wykonawcza Komisji (UE) 2017/1442 z dnia 31.07.2017 r. ustanawiająca konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do dużych obiektów energetycznego spalania zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE
- [30] Di Gregorio F., Zaccariello L., Fluidized bed gasification of a packaging derived fuel: energetic, environmental and economic performances comparison for waste-to-energy plants, *Energy*, 2012, 42, 1, 331-341.
- [31] Domasławski W., Utylizacja odpadów paleniskowych z kotłów fluidalnych, III sympozjum ECOENERGIA *98, Gdynia, 1-3.04.1998.
- [32] Duda J., Mączki mięsno-kostne paliwem w procesie wypalania klinkieru cementowego, Międzynarodowa konferencja pt. „Paliwa z odpadów”, Helion, Gliwice 2003.
- [33] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 21.10.2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią.
- [34] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24.11.2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola).
- [35] Emissions of trace species by coal-fired power plants in Europe, Thermal Generation Study Committee, Paris, UNIPEDE, 1996.
- [36] Fudała J., Strzelecka E., Borowska M., Emisja trwałych związków organicznych w Polsce, IV sympozjum „Ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery” POL-EMIS ‘98, Szklarska Poręba, czerwiec 1998.
- [37] Gałko G., Mazur I., Rejdak M., Jagustyn B., Hrabak J., Ouadi M., Jahangiri H., Sajdak M., Evaluation of alternative refuse-derived fuel use as a valuable resource in various valorised applications, *Energy*, 2023, Volume 263, Part D, 125920.
- [38] Garo A., Prado G., Lahaye J., Chemical aspects of soot particles oxidation in laminar methane-air diffusion flame, *Combustion and Flame*, 1990, 79.
- [39] Garrett Ch.W., On global climate change, carbon dioxide, and fossil fuel combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1992, 18, 369.
- [40] Glassman L., *Combustion*, Orlando, Academic Press, 1987.
- [41] González-Núñez S., Guerras L.S., Martín M., A multiscale analysis approach for the valorization of sludge and MSW via co-incineration, 2023, *Energy*, 263, Part E, 126081.
- [42] González-Núñez S., Guerras L.S., Martín M., A multiscale analysis approach for the valorization of sludge and MSW via co-incineration, *Energy*, 2023, 263, Part E, 126081.
- [43] Griffiths J.F., Banard J. A., *Flame and combustion*, Blackie Academic and Professional, London 1995.
- [44] Gu T., Ma W., Berning T., Guo Z., Andersson R., Yin C., Advanced simulation of a 750 t/d municipal solid waste grate boiler to better accommodate feedstock changes due to waste classification, *Energy*, 2022, Vol 254, Part B, 124338.
- [45] Gu T., Yin C., Ma W., Chen G., Municipal solid waste incineration in a packed bed: A comprehensive modeling study with experimental validation, *Applied Energy*, 2019, 247, 127-139.
- [46] Hayhurst A.N., Lawrence A.D., Emissions of nitrous oxide from combustion sources, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1992, 18, 369.
- [47] Pels, J.R., Wojtowicz M.A., Kapteijn F., Moulijn J.A., Trade-Off Between NO_x and N₂O in Fluidized-Bed Combustion of Coals, *Energy Fuels*, 1995, 9, 5, 743–52.
- [48] Heiztechnik, Dokumentacja techniczno-ruchowa kotła Q EKO, Skarszewy 2011.

- [49] Hesselmann G., Chakraborty R., Coal over coal reburn - the application of pilot scale test results to utility plant design, POWER-GEN Europe '98, Milan, June 9-11 1998.
- [50] Hoang Q.N., Vanierschot M., Blondeau J., Croymans T., Pittoors R., Caneghem J.V., Review of numerical studies on thermal treatment of municipal solid waste in packed bed combustion, Fuel Communications, 2021, 7, 100013.
- [51] Iluk T., Sobolewski A., Szul M., Zgazowanie w skali pilotowej stałych palnych odpadów komunalnych, biomasy oraz osadów ściekowych w generatorze gazu ze złożem stałym, Przemysł Chemiczny, 2016, t. 98, 8, s.1634-1640.
- [52] Irle M. A., The cleanliness of recovered wood. W: Rowell R. M., Caldeira F., Rowell J. K. [red.]. Sustainable development in the forest products industry. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2010, 85–97.
- [53] Ismail M.M., Dincer I., A new renewable energy based integrated gasification system for hydrogen production from plastic wastes, Energy, 2023, 270, 126869.
- [54] Jakość powietrza w ocenie mieszkańców województwa małopolskiego, Raport z badań zrealizowanych w ramach projektu LIFE, Krakowski Alarm Smogowy, Kraków 2018.
- [55] Janosz-Rajczyk M., (red.), Badania wybranych procesów oczyszczania ścieków, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008.
- [56] Jarosiński J., Techniki czystego spalania, WNT, Warszawa 1996.
- [57] Jasieńko S. (red.), Chemia i fizyka węgla, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [58] Jaworski W., Program proekologiczny dla elektroenergetyki - jakie priorytety, Sympozjum ECOENERGIA '97, Gdynia, 22-23.04.97.
- [59] Johanutgen U., Dorr H., Bruggemann H., Scheffknecht G., First experience after retrofitting the firing system in the Bexbach I Power Plant, Konferencja pt. „Spalanie węgla 99”, Ustroń, 24-26.03.1999.
- [60] Jouhara H., Czajczyńska D., Ghazal H., Krzyżyńska R., Anguilano L., Reynolds A.J., Spencer N., Municipal waste management systems for domestic use, Energy, 2017, 139, 485-506.
- [61] Kapitaniak J., Wykorzystanie pomiarów stężeń tlenków siarki i azotu do obliczeń ich emisji w aplikacji praktycznej, Gospodarka Paliwami i Energią, 1991, 7, 11.
- [62] „Klasyfikacja odpadów - Katalog i rodzaje odpadów”. Dostęp 19.01.2023. www.ekologis.com.pl/regulacje-prawne/klasyfikacja-odpadow-katalog-i-rodzaje-odpadow.
- [63] Kokkinos A., Cichanowicz J.E., Eskinazi D., Stallings J., Offen G., NOx control for utility boilers: highlights of the EPRI July 1992 Workshop, J. Air Waste Manage Assoc., 1992, 42, 11.
- [64] Kordylewski W., Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [65] Kordylewski W., Spalanie i paliwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [67] „Kotły podajnikowe na węgiel”. Dostęp 10.02.2023. www.czysteogrzewanie.pl/czym-ogrzewac/kotly-automatyczne-na-wegiel.
- [68] „Kotły z podajnikiem ślimakowym typu EKR”. Dostęp 10.02.2023. www.tilgner.pl/kotly-ekr.
- [69] „Krajowy Bilans Emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990 -2020 - Raport syntetyczny.” Dostęp 19.01.2023. www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji.
- [70] „Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2022 - Raport syntetyczny”. Dostęp 19.01.2023. www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji.
- [71] Kubica K., Powstawanie i emisja WWA podczas spalania węgla, Konferencja pt. „Spalanie węgla '99”, Ustroń-Zawodzie, 24-26 marca 1999.
- [72] Kubica K., Ustawa antysmogowa - szansa czy zagrożenie?, Magazyn Instalatora, 2016, 2, 32-34.
- [73] Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M., Energetyka a ochrona środowiska, PWN, Warszawa 1993.
- [74] Kułażyński M., Katalityczne metody usuwania SQ; oraz NO_x ze spalin, Konferencja pt. „Niskoemisyjne techniki spalania”, Ustroń-Zawodzie, 28-30 marca 1996.

- [75] Kumar A., Samadder S.K., Development of lower heating value prediction models and estimation of energy recovery potential of municipal solid waste and RDF incineration, *Energy*, 2023, 274, 127273.
- [76] Kumar A., Singh E., Mishra R., Lo S.L., Kumar S., Global trends in municipal solid waste treatment technologies through the lens of sustainable energy development opportunity, *Energy*, 2023, 275, 127471.
- [77] Kurowska A., Struktura podaży odpadów drzewnych w Polsce, *Sylwan*, 2016, 160, 3, 187-196.
- [78] Lahaye J., Prado G., *Soot in Combustion Systems and its Toxic Properties*, Plenum Press, New York 1984.
- [79] Lee C.H., Liu J.C., Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning, *Advances in Environmental Research* 2001, 5, 129-136.
- [80] Lemieux P., Stewart E., Realf M., Mulholland J.A., Emissions study of co-firing waste carpet in a rotary kiln, *Journal of Environmental Management*, 2004, 70, 1, s.27-33.
- [81] Lochno A., Placek A., Rackiewicz I., Przybyła T. i in., Wyniki modelowania stężeń PM10, PM2,5, SO2, NO2, B(a)P na potrzeby rocznej oceny jakości powietrza dla roku 2017. Praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska przez Atmoterm S.A., Opole 2018.
- [82] Łapucha R., Problemy emisji zanieczyszczeń z silników lotniczych, II semin. nauk. „Procesów spalania”, PIS, Warszawa 1997.
- [83] Magnanelli E., Lehn Tranås O., Carlsson P., Mosby J., Becidan M., Dynamic modeling of municipal solid waste incineration, *Energy*, 2020, 209, 118426.
- [84] Malinauskaite J., Jouhara H., Czajczyńska D., Stanchev P., Katsou E., Rostkowski P., Thorne R.J., Colón J., Ponsá S., Al-Mansour F., Anguilano L., Krzyżyńska R., López I.C., Vlasopoulos A., Spencer N., Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe, *Energy*, 2017, 141, 2013-2044.
- [85] Mastalerz P., *Podręcznik chemii organicznej*, Wyd. Chemiczne, Wrocław 1998.
- [86] Materiały informacyjne firmy PENTOL-Enviro Polska Sp. z o.o.
- [87] Merl A. D., Humar M., Okstad T., Picardo V., Ribeiro A., Steierer F. Amounts of recovered wood in COST E31 countries and Europe. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference - Management of Recovered Wood, 2-4 May 2007, Klagenfurt, Austria. 79-116.
- [88] Mniszek W., Określanie emisji rtęci ze źródeł przemysłowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Gliwice 1995.
- [89] Musialik-Piotrowska A., Syczewska K., Mendyka B., Katalityczne utlenianie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w gazach odlotowych z różnych źródeł, TV sympozjum „Ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery” POL-EMIS ‘98, Szklarska Poręba, czerwiec 1998.
- [90] Muthuraman M., Namioka T., Yoshikawa K., Characteristics of co-combustion and kinetic study on hydrothermally treated municipal solid waste with different rank coals: A thermogravimetric analysis, *Applied Energy*, 2010, 87, 1, 141-148.
- [91] Nadziakiewicz J., Warunki autotermicznego spalania odpadów stałych, *Gospodarka Paliwami i Energią*, 2000, 10.
- [92] „Najbardziej zanieczyszczone miasta w Europie”. Dostęp 13.06.23. www.smoglab.pl/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-w-europie.
- [93] Nelles M., Grünes J., Morscheck G., Waste Management in Germany - Development to a Sustainable Circular Economy?, *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 35, 6-14.
- [94] Nowak M., Szul M., Possibilities for application of alternative fuels in Poland, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 2016, t. 18, 1, 33-44.
- [95] Nowak W., Wandrasz A.J., Odpady jako źródło paliwa energetycznego, materiały III międzynarodowej konferencji „Spalanie odpadów - technologie i problemy”, Szczyrk 30 września-2 października 1997, Szczyrk 1997.
- [96] *Ochrona środowiska '1998*, GUS, Warszawa 1998.
- [97] „Ochrona środowiska 2021”. Dostęp 19.01.2023. www.stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko.

- [98] „Odpad a produkt uboczny pochodzenia zwierzęcego”. Dostęp 27.01.2023. www.sozosfera.pl/odpady/odpad-a-produkt-uboczny-pochodzenia-zwierzecego.
- [99] Ojczyk G., Rynek kotłów stałopalnych w Polsce. Charakterystyka i perspektywy, Polski Instalator, 2014, 1, 10-12.
- [100] Okstad T. Terminology for recovered wood in the forest product chain - a scientific perspective. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference - Management of Recovered Wood, 2–4 May 2007, Klagenfurt, Austria, 35–47.
- [101] Orzechowski Z., Prywert J., Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych, WNT, Warszawa 1994.
- [102] Pancerpol, Instrukcja eksploatacji i obsługi podajnika paliwa stałego typu PPSM z możliwością spalania miałów, Dąbrowa Górnicza 2010.
- [103] Park Y.K., Kim W., Jo Y.M., Release of Harmful Air Pollutants from Open Burning of Domestic Municipal Solid Wastes in a Metropolitan Area of Korea, Aerosol Air Quality Research, 2013, 13, 1365-1372.
- [104] Pawłowski P., Bałazińska M., Ignasiak K., Robak J., Przygotowanie odpadów komunalnych do ich energetycznego wykorzystania : paliwo typu SRF, Piece Przemysłowe & Kotły, 2016, 4, 20-26.
- [105] PN-EN 15358:2011 Stałe paliwa wtórne - Systemy zarządzania jakością - Szczegółowe wymagania dla ich zastosowania do produkcji stałych paliw wtórnych.
- [106] PN-EN 15408:2011 Stałe paliwa wtórne - Metody oznaczania zawartości siarki (S), chloru (Cl), fluoru (F) i bromu (Br).
- [107] PN-EN 15410:2011 Stałe paliwa wtórne - Metody oznaczania pierwiastków głównych (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti).
- [108] PN-EN 15411:2011 Stałe paliwa wtórne - Metody oznaczania pierwiastków śladowych (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V i Zn).
- [109] PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze - Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW - Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
- [110] PN-EN ISO 21637:2021-06 Stałe paliwa wtórne - Terminologia.
- [111] PN-EN ISO 21640:2021-10 Stałe paliwa wtórne - Specyfikacje i klasy.
- [112] PN-EN ISO 21645:2021-0 Stałe paliwa wtórne - Metody pobierania próbek.
- [113] PN-EN ISO 21654:2021-12 Stałe paliwa wtórne - Oznaczanie wartości opałowej.
- [114] PN-EN ISO 21656:2021-08 Stałe paliwa wtórne - Oznaczanie zawartości popiołu.
- [115] PN-EN ISO 21663:2021-06 Stałe paliwa wtórne - Metody instrumentalne oznaczania zawartości węgla (C), wodoru (H), azotu (N) i siarki (S).
- [116] PN-EN ISO 21912:2021-08 Stałe paliwa wtórne - Bezpieczne obchodzenie się i przechowywanie stałych paliw wtórnych.
- [117] PN-Z-15006:1993 Odpady komunalne stałe - Oznaczanie składu morfologicznego
- [118] PN-Z-15008:1993 Odpady komunalne stałe - Badania właściwości paliwowych
- [119] Podedworna J., Umiejewska K., Technologia osadów ściekowych., Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [120] „Podejrzenie spalania odpadów - jak przebiega kontrola palenisk?”. Dostęp 28.02.2023. www.przemyslrodowisko.pl/podejrzenie-spalania-odpadow-jak-przebiega-kontrola-palenisk.
- [121] Popena A., Kozak J., Włodarczyk-Makuła M., Stabilizacja tlenowa osadów komunalnych i przemysłowych, ECOpole'18 Conference, Polanica Zdrój 10-13.10.2018, 2019, 13(1) s.145-154.
- [122] Poza kontrolą - analiza systemu kontroli palenisk domowych, Krakowski Alarm Smogowy, Kraków 2018.
- [123] „Przegląd uchwał antysmogowych”. Dostęp 07.02.2023. www.czysteogrzewanie.pl/podstawy/uchwaly-antysmogowe.
- [124] Rada E.C., Cioca L., Optimizing the Methodology of Characterization of Municipal Solid Waste in EU Under a Circular Economy Perspective, Energy Procedia, 2017, 119, 72-85.
- [125] Ratajczak E., Bidzińska G., Szostak A., Frąckowiak I. Foresight w drzewnictwie - Polska 2020. Instytut Technologii Drewna, Poznań 2011.

- [126] Ratajczak E., Szostak A., Bidzińska G., *Drewno użytkowe w Polsce*, Instytut Technologii Drewna, Poznań 2003.
- [127] *Refuse derived fuel, current practice and perspectives - Final Report*, European Commission - Directorate General Environment 2003.
- [128] Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) 2015/1187 z dnia 27.04.2015 r. uzupełniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/30/UE w odniesieniu do etykiet efektywności energetycznej dla kotłów na paliwo stałe i zestawów zawierających kocioł na paliwo stałe, ogrzewacze dodatkowe, regulatory temperatury i urządzenia słoneczne.
- [129] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1357/2014 z dnia 18.12.2014 r. w sprawie odpadów oraz uchylającej niektóre dyrektywy.
- [130] Rozporządzenie Komisji UE 2015/1189 z dnia 28.04.2015 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe.
- [131] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2.01.2020 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz. U. z 2019 r. poz. 701, 730, 1403 i 1579.
- [132] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21.10.2009 r. określające przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi, i uchylające rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego).
- [133] Scotto M.V., Bassham E.A., Wendt J.O.L., Peterson T.W., Quench-induced nucleation of ash constituents during combustion of pulverized coal in laboratory furnace, *Proceedings of 22nd Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh 1988.
- [134] Seweryniak M. i in., *Efektywność redukcji NO metodą „reburning” z wykorzystaniem sadzy*, Sprawozdanie nr 7/98, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1998.
- [135] Sharma S., Basu S., Shetti N.P., Kamali M., Walvekar P., Aminabhavi T.M., Waste-to-energy nexus: A sustainable development, *Environmental Pollution*, 2020, 267, 115501.
- [136] sigraiová Z., Tavares G., Semiao V., Graça Carvalho M., Integrated waste-to-energy conversion and waste transportation within island communities, *Energy*, 2009, 34, 5, 623-635.
- [137] Sobolewski A., *Odzysk energii z odpadów - kłopot społeczny czy niewykorzystana szansa biznesowa?*, materiały XI konferencji „Paliwa z Odpadów”, Wisła 8-9 czerwca 2021, Wisła 2021.
- [138] Staisz J., Pason-Konieczńska A., Konieczński J., Bilans pierwiastków śladowych emitowanych w procesie spalania węgla kamiennego, *Konferencja pt. „Spalanie węgla ‘99’*, Ustroń-Zawodzie, 24-26 marzec 1999.
- [139] „Stan Środowiska w Polsce. Raport 2018”. Dostęp 01.02.2023. www.gov.pl/web/gios/raporty-o-stanie-srodowiska-w-polsce.
- [140] „Stan Środowiska w Polsce. Raport 2022”. Dostęp 13.06.2023. www.gov.pl/web/gios/raporty-o-stanie-srodowiska-w-polsce.
- [141] Stec M., Kurzeja E., Kościółek A., Pawłowska-Góral K., Zagrożenia wynikające z narażenia na dioksyny i dioksynopodobne polichlorowane bifenyle, *Problemy Higieny i Epidemiologii*, 2012, 93 (4), 639-646.
- [142] Tabasová A., Kropáč J., Kermes V., Nemet A., Stehlik P., Waste-to-energy technologies: Impact on environment, *Energy*, 2012, 44, 1, 146-155.
- [143] TESTO, *Instrukcja obsługi analizatora spalin TESTO 350-S*, 2011.
- [144] Tilgner, *Dokumentacja techniczno-ruchowa kotła EKR*, Pleszew 2009.
- [145] Tillman D.A., *The Combustion of Solid fuels and Wastes*, Academic Press Inc., San Diego 1991.
- [146] Topper J.M. et al., Clean coal technology for power generation and cogeneration, *Fuel*, 1993, 73, 7.
- [147] „Uboczne produkty pochodzenia zwierzęcego”. Dostęp 27.01.2023. www.wetgiw.gov.pl/nadzor-weterynaryjny/uboczne-produkty-pochodzenia-zwierzecego.
- [148] Uchwała nr XXXIX/941/17 Sejmiku Województwa Wielkopolskiego z dnia 18.12.2017 r.
- [149] Uchwała nr XXXIX/942/17 Sejmiku Województwa Wielkopolskiego z dnia 18.12.2017 r.

- [150] Uchwała nr XXXIX/943/17 Sejmiku Województwa Wielkopolskiego z dnia 18.12.2017 r.
- [151] Urbaniak R., Bartoszewicz J., Work boilers in the real heat loads , *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2013, 3, 2, 121-126.
- [152] Urbaniak R., Analiza pracy kotłów małej mocy w warunkach zmiennych obciążeń cieplnych, Politechnika Poznańska, Poznań 2013 [rozprawa doktorska].
- [153] Urbaniak R., Bartoszewicz J., Kłosowiak R., Nygard A., The concept of the test bench to measure the risks of stopping the burner in automatic solid fuel boilers, 19th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction 2016, Praha, 27-31.08.2016.
- [154] Urbaniak R., Optymalizacja pracy automatycznych urządzeń grzewczych o małej mocy - wybrane aspekty, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2018.
- [155] Ustawa z dn. 14.12.2012 r. o odpadach, Dz. U. z 2021 r. poz. 779, 784, 1648, 2151.
- [156] Ustawa z dn. 20.07.1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska Polski Dz. U. 1991 Nr 47 poz. 335.
- [157] Ustawa z dn. 22.07.2006 r. o paszach, Dz. U. 2006 Nr 144 poz. 1045
- [158] Ustawa z dn. 23.08.2001 r. o środkach żywienia zwierząt, Dz. U. nr 123, poz. 1350
- [159] Ustawa z dnia 27.04.2001 r. Prawo ochrony środowiska, Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 627.
- [160] Van Tubergen J., Glorius T., Waeyenbergh E.: Classification of Solid Recovered Fuels. ERFO 2005.
- [161] Vogt M., Gann M., Irle M. Detection methods in practical application. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference - Management of Recovered Wood, Klagenfurt, Austria 2-4 May 2007, 131–155.
- [162] Wandrasz J.W., Gąska K., Usuwanie i unieszkodliwianie odpadów medycznych, *Przegląd Komunalny*, 1998, 3.
- [163] Wandrasz J.W., Wandrasz A.J., Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych, Wyd. Seidel-Przywecki sp. z o.o., Warszawa 2006.
- [164] Wandrasz J.W., Wróblewicz T., Wartość opałowa odpadów przeznaczonych do utylizacji termicznej, w funkcji rozwiązań systemowych zintegrowanej gospodarki stałymi odpadami komunalnymi, *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1996, 11.
- [165] Wasielewski R., Stelmach S.: Stałe paliwa wtórne. Część I - Klasyfikacja i charakterystyka. *KARBO* 2007, 3, 164-170. Solid recovered fuels Part I-Classification and characteristics - Publisher in *KARBO* 2007, 3, 164-170.
- [166] Wasilewski R., Stelmach S., Sobolewski A., Wytwarzanie i wykorzystywanie stałych paliw wtórnych *CHEMIK* 2011, 65, 6, 572-579
- [167] Wayne R.P., *Chemistry of atmospheres*, 2nd Ed., Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1991.
- [168] Werther J., Ogada T., Sewage sludge combustion, *Prog. Energy Combust, Sci.*, 1999, 25.
- [169] „WHO Ambient Air Quality Database”. Dostęp 13.06.23.
www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database.
- [170] Wilk R.K. (red.), *Laboratorium techniki spalania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [171] Wiłk R., Szlęk A., Zieliński Z., Wpływ warunków spalania oraz modelu tworzenia WWA przy spalaniu lekkiego oleju opałowego, *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1995, 12.
- [172] Wolski P., Wolny L., Zawieja I., Kondycjonowanie osadów nadmiernych poddanych stabilizacji a ich odwadnialność, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2010, t. 13, 1, 67-77.
- [173] Wołański P. (red.), *Problemy spalania w silnikach wewnętrznego spalania*, Ekspertyza PAN, Warszawa 1999.
- [174] Wójtowicz-Wróbel A., Kania O., Kocewiak K., Wójtowicz R., Dzierwa P., Trojan M., Thermal-flow calculations for a thermal waste treatment plant and CFD modelling of the spread of gases in the context of urban structures, *Energy*, 2023, 263, Part D, 125952.
- [175] Wróblewska H., Czajka M., The influence of compost obtained from composite wood waste and post-used wood on plant growth. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference - Management of Recovered Wood, Klagenfurt, Austria 2–4 May 2007, 293–307.
- [176] Wzorek M., Król A., Ocena jakości paliw z odpadów stosowanych w procesach współspalania z węglem, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, 2012, t.5, 10.

- [177] Xia H., Tang J., Aljerf L., Wang T., Qiao J., Xu Q, Wang Q, Ukaogo P., Investigation on dioxins emission characteristic during complete maintenance operating period of municipal solid waste incineration, *Environmental Pollution*, 2023, 318, 120949.
- [178] Zakrzewski S.F., *Podstawy toksykologii środowiska*, PWN, Warszawa 1995.
- [179] Zakrzewski S.F., *Postawy toksykologii środowiska*, PWN, Warszawa 1995.
- [180] Zarzycki R., Wielgosiński G., *Gospodarka odpadami komunalnymi w metropoliach polskich, III Międzynarodowa konferencja „Spalanie odpadów - technologie i problemy”*, Szczyrk 30 września - 2 października 1997, Szczyrk 1997.
- [181] Zarzycki R., Wielgosiński G., *Gospodarka odpadami komunalnymi w metropoliach polskich, III Międzynarodowa konferencja „Spalanie odpadów - technologie i problemy”*, Szczyrk 30 września - 2 października 1997, Szczyrk 1997.
- [182] Zwierzycki W., *Paliwa silnikowe oleje opałowe*, ITE, Radom 1997.

Załączniki

Nr 1. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin kotła Heiztechnik Q EKO 15

Tab. 6.4. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

I partia odpadów							
Tlen							
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 120 s	IV okres Czas pomiaru: 300 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]
5	14.98	3.01	17.98	9.58	8.40	15.88	70
10	13.88	4.00	17.89	13.97	3.92	13.59	46
15	9.39	6.61	15.99	12.88	3.11	9.18	57
Tlenek węgla							
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 300 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]
5	1717	605	1112	5042	6154	1538	40
10	427	111	316	13489	13805	820	70
15	998	181	817	10399	11216	836	150
Temperatura spalin							
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 300 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]
5	225	10	215	50	265	253	70
10	300	14	286	51	337	337	0
15	404	23	381	31	411	414	90

Tab. 6.5. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska drugiej partii odpadów w podczas pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

II partia odpadów										
Tlen										
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 300 s	IV okres Czas pomiaru: 500 s	IV okres Czas pomiaru: 700 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	
5	15.88	2.30	18.18	12.56	5.61	15.878	17.681	15.17	267	
10	13.49	3.79	17.28	13.66	3.61	13.591	17.084	15.07	220	
15	9.90	5.28	15.18	11.86	3.32	15.173	15.173	10.89	406	
Tlenek węgla										
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 280 s	III okres Czas pomiaru: między 280 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 700 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	
5	1068	329	739	7428	8167	2861	329	1533	210	
10	619	307	312	4195	4507	6623	386.8	704	320	
15	857	347	510	11117	11627	12729	459.9	476	520	
Temperatura spalin										
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 400 s	III okres Czas pomiaru: 500 s	III okres Czas pomiaru: 700 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
5	218	5	213	116	329	213	171	152	220	0
10	306	37	269	118	387	269	209.1	220	180	110
15	405	95	310	150	460	310	330.4	364	220	500

Tab. 6.6. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

III partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
5	16.38	2.49	18.87	18.84	0.04	16.79	133	28
10	13.88	2.80	16.68	16.65	0.04	14.97	95	48
15	9.00	6.38	15.38	15.35	0.03	10.39	306	82
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
5	862	345	517	17216	17733	991	100	0
10	368	145	223	24777	25000	691	170	70
15	276	64	212	24788	25000	377	350	70
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
5	207	4	203	119	321	173	210	0
10	326	11	315	74	389	222	190	0
15	400	19	381	71	452	343	220	190

Tab. 6.7. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

IV partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 300 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
5	17.08	1.89	18.98	18.66	0.31	16.61	304	10
10	13.79	3.69	17.48	17.44	0.03	15.07	133	91
15	10.19	5.80	15.99	15.96	0.03	11.59	357	163
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 450 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
5	795	288	507	15030	15537	1293	210	0
10	891	418	473	24527	25000	917	270	100
15	1128	572	556	24444	25000	447	460	130
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 450 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
5	207	5	202	161	363	192	270	0
10	331	15	316	97	413	227	220	0
15	402	23	379	79	458	295	220	130

Tab. 6.8. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

V partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 450 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocy	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
5	16.78	4.01	20.79	20.75	0.03	17.37	175	106
10	14.27	6.20	20.48	20.44	0.04	14.65	151	95
15	10.00	10.08	20.08	20.05	0.04	10.99	264	114
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 450 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocy	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
5	801	630	171	24829	25000	903	190	100
10	952	687	265	24735	25000	851	210	60
15	293	217	76	24924	25000	185	300	120
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 180 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 180 ÷ 450 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
5	147	11	136	130	266	182	60	0
10	244	36	209	154	362	235	170	0
15	335	77	257	199	456	292	170	360

Tab. 6.9. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła Heiztechnik Q EKO 15

VI partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
5	16.47	3.91	20.38	20.35	0.03	14.49	449	238
10	13.98	6.39	20.38	20.34	0.04	15.49	188	127
15	11.19	9.20	20.38	20.35	0.04	11.29	340	159
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 500 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
5	1018	772	246	24754	25000	1585	430	240
10	1265	858	407	24593	25000	1955	490	100
15	284	196	88	24912	25000	239	360	150
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 180 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 180 ÷ 500 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
5	148	11	137	44	181	167	0	0
10	242	38	204	179	382	242	160	0
15	336	64	272	165	437	297	130	380

Nr 2. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin kotła Tilgner EKR 20

Tab. 6.10. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska pierwszej partii odpadów podczas pracy kotła Tilgner EKR 20

I partia odpadów							
Tlen							
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 120 s	IV okres Czas pomiaru: 300 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]
7	14.68	2.70	17.37	8.68	8.69	13.37	0
13	13.17	4.61	17.78	12.86	4.92	12.78	13
20	10.98	5.90	16.89	14.77	2.11	10.59	37
Tlenek węgla							
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 300 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]
7	1109	349	760	2800	3560	694	90
13	1090	389	701	2819	3520	1108	40
20	534	60	474	3888	4362	509	30
Temperatura spalin							
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 300 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]
7	269	4	266	50	315	315	60
13	298	6	292	21	314	314	0
20	303	7	296	14	309	0	210

Tab. 6.11. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska drugiej partii odpadów podczas pracy kotła Tilgner EKR 20

II partia odpadów										
Tlen										
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: 100 s	IV okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 350 s	V okres Czas pomiaru: między 250 ÷ 400 s	VI okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
7	14.37	2.81	17.18	14.57	2.61	4.51	2.61	14.97	230	0
13	13.58	3.10	16.68	16.48	0.20	6.02	0.20	14.47	205	22
20	8.90	5.97	14.87	14.83	0.04	7.01	3.01	9.29	567	28
Tlenek węgla										
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 180 s	III okres Czas pomiaru: między 180 ÷ 350 s	III okres Czas pomiaru: między 200 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	
7	891	411	480	3005	3485	1608	1608	482	260	
13	963	283	680	5027	5707	744	2133	474	170	
20	532	97	435	8063	8498	119	4816	921	290	
Temperatura spalin										
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 400 s	III okres Czas pomiaru: 500 s	III okres Czas pomiaru: 700 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
7	273	6	267	82	349	252	207	188	200	0
13	321	8	313	93	406	286	234	206	380	0
20	326	3	323	16	339	252	197	175	410	10

Tab. 6.12. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska trzeciej partii odpadów podczas pracy kotła Tilgner EKR 20

III partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
7	15.07	2.31	17.37	17.34	0.03	15.57	87	32
13	11.49	5.40	16.89	16.86	0.03	11.29	125	74
20	9.18	5.69	14.87	14.83	0.04	9.29	567	31
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 250 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
7	810	178	632	18669	19301	471	90	0
13	548	17	531	24469	25000	707	170	60
20	640	14	626	24374	25000	572	270	60
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
7	269	5	264	108	372	191	220	0
13	308	3	305	65	370	163	220	0
20	307	2	306	37	343	236	350	20

Tab. 6.13. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska czwartej partii odpadów podczas pracy kotła Tilgner EKR 20

IV partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 200 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
7	13.78	3.20	16.98	16.95	0.03	15.08	93	51
13	12.67	5.01	17.69	17.65	0.03	12.99	107	71
20	10.29	5.48	15.77	15.74	0.03	10.39	483	80
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 250 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
7	803	107	696	24304	25000	632	210	60
13	696	128	568	24432	25000	552	200	70
20	515	37	478	24522	25000	413	270	90
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 900 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
7	295	8	286	92	378	190	210	0
13	298	7	291	72	363	159	170	0
20	318	11	307	48	355	190	420	50

Tab. 6.14. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska piątej partii odpadów podczas pracy kotła Tilgner EKR 20

V partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 250 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
7	17.88	3.01	20.89	20.85	0.03	17.37	125	56
13	13.98	6.80	20.78	20.75	0.03	14.57	106	77
20	9.08	11.70	20.78	20.75	0.03	10.69	84	56
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 250 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
7	580	420	160	7837	7997	593	160	0
13	376	229	147	24853	25000	700	140	40
20	1091	839	252	24748	25000	663	100	70
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 400 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
7	295	8	286	92	378	218	210	0
13	208	26	182	170	353	256	250	0
20	237	48	189	117	306	306	250	0

Tab. 6.15. Zestawienie wyników zawartości tlenu, tlenku węgla oraz temperatury spalin na skutek doprowadzenia do paleniska szóstej partii odpadów podczas pracy kotła Tilgner EKR 20

VI partia odpadów								
Tlen								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość wzrostu poziomu tlenu między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 80 s	Wartość spadku poziomu tlenu między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 80 ÷ 250 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości tlenu poniżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości tlenu na poziomie bliskiemu zeru
[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[s]	[s]
7	18.17	2.72	20.89	20.85	0.03	17.31	147	90
13	13.58	7.30	20.88	20.85	0.03	12.78	177	133
20	10.39	10.19	20.58	20.54	0.03	10.00	127	87
Tlenek węgla								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: między 0 ÷ 50 s	Wartość spadku poziomu CO między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 100 s	Wartość wzrostu poziomu CO między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 100 ÷ 300 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości CO powyżej poziomu charakteryzującego pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się CO powyżej górną granicy pomiarowej analizatora spalin w wysokości 25000 ppm
[kW]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[s]	[s]
7	439	309	130	19235	19365	586	160	0
13	705	489	216	24784	25000	693	170	110
20	594	367	227	24773	25000	311	130	80
Temperatura spalin								
Moc kotła	I okres Czas pomiaru: 50 s	Wartość spadku poziomu temp. spalin między I i II okresem	II okres Czas pomiaru: między 50 ÷ 130 s	Wartość wzrostu poziomu temp. spalin między II i III okresem	III okres Czas pomiaru: między 130 ÷ 500 s	IV okres Czas pomiaru: 600 s	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin ponad poziomem charakt. pracę kotła z ustaloną mocą	Czas utrzymywania się wartości temp. spalin poniżej poziomu charakt. pracę kotła z ustaloną mocą
[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[s]
7	138	13	125	192	318	238	160	70
13	229	29	200	174	373	280	250	0
20	290	62	228	91	301	319	310	0