

Michał JANICKI<sup>1</sup>

## STĘŻENIA PODSTAWOWYCH ZANIECZYSZCZEŃ W GAZACH SPALINOWYCH POWSTAJĄCE PODCZAS SPALANIA SŁOMY I DREWNA W KOTLE WSADOWYM MAŁEJ MOCY

W kraju najbardziej rozpowszechnione, a tym samym najczęściej stosowane w systemach ciepłowniczych małej mocy, są kotły wsadowe. Wykorzystywane są one najczęściej do celów grzewczych oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej w gospodarstwach domowych zabudowy rozproszonej [1]. Jednostki te charakteryzują się wysoką bezwładnością energetyczną, wpływającą na brak stabilizacji procesu spalania. Ponadto spalanie paliw w kotłach małej mocy odbywa się z zastosowaniem paliw o dużym zróżnicowaniu parametrów technicznych i elementarnych, a aspekt ekonomiczny jest dla gospodarstw domowych coraz częściej wyznacznikiem formy i jakości spalanego paliwa, niezależnie od kotłów, w których to paliwo ulega termicznemu przekształceniu. Okoliczności te sprzyjają powstawaniu podwyższonych ładunków zanieczyszczeń, zarówno pyłowych, jak i gazowych, wprowadzanych do środowiska. To właśnie rozproszona niska emisja przyczynia się do różnych zagrożeń, w tym coraz częściej odczuwalnego smogu, dlatego niezwykle ważne jest opracowanie niskoemisyjnych i wysoko sprawnych technologii spalania paliw w kotłach małej mocy. W pracy przedstawiono charakterystykę emisyjną kotła Ekopal RM o mocy 30 kW podczas spalania słomy w kostkach oraz drewna kawałkowego. Przedstawiono charakterystykę spalanego paliwa przez wykonanie jej analizy składu fizyko-chemicznego. Podczas testów emisyjnych zastosowano słomę zbożową w kostkach o wymiarach 0,4 x 0,4 x 0,9 m (6 szt./wsad) oraz dębinę w polanach o długości do 0,55 m. Przedstawiono wyniki w postaci szeregów czasowych poziomu stężeń gazowych substancji oraz frakcji pyłowej, mierzonych na czopuchu kotła.

**Słowa kluczowe:** spalanie biomasy, analiza techniczna i elementarna paliwa, słoma zbożowa, drewno opałowe, układ pomiarowy, stężenie zanieczyszczeń

### 1. Wprowadzenie

W procesie spalania biomasy w komorach zasypowych na ruszcie stałym emisja zanieczyszczeń jest znacznie wyższa niż w przypadku palenisk innych

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Michał Janicki, Ove Arup & Partners International Ltd Sp. z o.o. Oddział w Polsce, ul. Królewska 16, 00-103 Warszawa, tel. (71) 7196857, e-mail: [michal.janicki@arup.com](mailto:michal.janicki@arup.com)

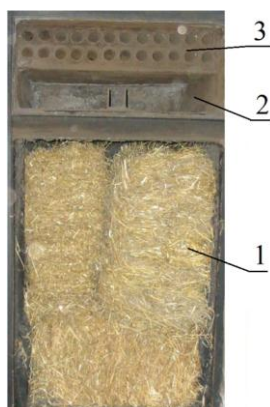
typów [2]. Emisja ta jest największa w momencie narzutu paliwa do komory i w pierwszym etapie procesu spalania, co jest uwarunkowane schładzaniem komory w trakcie załadunku oraz niedostatecznym natlenieniem załadowanego paliwa w jego objętości [3]. W paleniskach ze szczelnym procesem ciągłego zasypu paliwa można znacznie ograniczyć emisję ze względu na podawaną jednorodną grubość biomasy na ruszt. Spowoduje to możliwość całkowitego natlenienia objętości podawanego paliwa, co warunkuje prawidłowy proces pirolizy biomasy [4].

Celem niniejszej pracy jest opracowanie charakterystyki przebiegu spalania słomy i drewna w kotle wsadowym małej mocy z dolnym spalaniem na podstawie przebiegów czasowych stężeń rejestrowanych na wylocie z kotła.

## 2. Charakterystyka badanego obiektu

Jako jednostkę badawczą wytypowano kocioł wodny, stalowy, Ekopal RM o mocy 30 kW, wyprodukowany przez firmę MetalERG, przystosowany do spalania słomy w kostkach. Możliwe jest również spalanie w kotle drewna kawałkowego, zrębek, trocin, odpadów włókienniczych i innych rodzajów biomasy. Jest to jednostka z dolnym spalaniem w części objętości złoża [5] składająca się z (rys. 1.):

- komory paleniskowej wykonanej ze stali kotłowej oraz płyty żarobetonowej umiejscowionej w dolnej części komory,
- strefy dopalania zlokalizowanej w tylnej części kotła, jest ona częściowo wyłożona elementami ceramicznymi,
- kolektora przelotowego, połączenia przestrzeni dopalania oraz rurowego wymiennika ciepła,
- rurowego wymiennika ciepła zlokalizowanego w górnej części kotła.

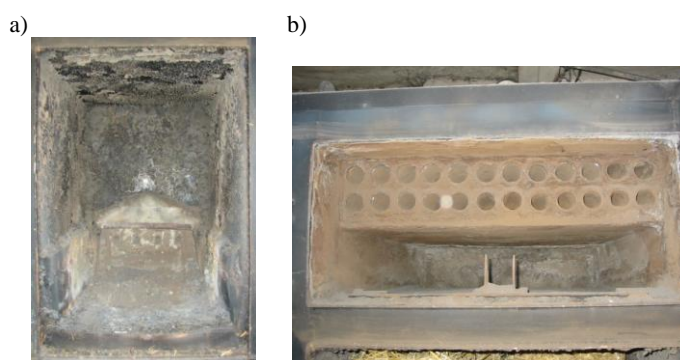


Rys. 1. Widok kotła RM 30: 1 – komora paleniskowa, 2 – kolektor przelotowy, 3 – rurowy poziomy wymiennik ciepła

Fig. 1. RM 30 boiler view: 1 – combustion chamber, 2 – through collector, 3 – horizontal tubular heat exchanger

Do komory paleniskowej (1) są wprowadzane bele słomy o wilgotności 15%, gdzie następuje odgazowanie i spalanie. W kolejnej przestrzeni przy udzia-

le powietrza wtórnego następuje dopalanie frakcji palnych. Sterowanie pracą kotła następuje za pomocą układu regulacji podawanego powietrza. W tylnej części jednostki znajdują się wentylatory zaopatrzone w falowniki służące do zmiany ilości doprowadzanego powietrza. Powietrze pierwotne jest rozdzielane na: strumień główny podawany przeciwnie do kierunku komory oraz strumienie boczne. Powyżej strefy powietrza pierwotnego znajduje się tzw. strefa „wygrzana”, gdzie strumień powietrza wtórnego jest doprowadzany za pomocą szeregu dysz wprowadzających prostopadle strumień powietrza wtórnego w stosunku do przepływu gazów w kotle. Następnie dopalone gorące gazy są kierowane za pomocą kolektora przelotowego (2) do rurowego poziomego wymiennika ciepła (3), gdzie następuje schłodzenie spalin. Rozpalenie kotła przeprowadza się ręcznie za pomocą króćca znajdującego się w bocznej, dolnej, tylnej części kotła. Przestrzeń kolektora przelotowego i komory paleniskowej jest połączony za pomocą kryzy, która jest otwierana na okres rozpalenia w celu zapewnienia krótkiego obiegu gazów spalinowych w kotle (rys. 2.).



Rys. 2. Widok na komorę spalania (a) oraz wymiennik ciepła (b)

Fig. 2. The combustion chamber (a) and the heat exchanger (b)

Kotły na słomę Ekopal RM pracują tylko w układzie otwartym. Do ich optymalnego wykorzystania w układzie grzewczym konieczne jest zastosowanie zbiornika akumulacji ciepła. Prawidłowa eksploatacja układu zaopatrzenia w ciepło jest determinowana przez właściwie dobraną wielkość zbiornika.

### 3. Analiza techniczna i elementarna badanego paliwa

W ramach analizy technicznej oznaczono:

- zawartość wilgoci metodą suszarkową polegającą na suszeniu próbki w temperaturze 105-110°C do stałej masy – według PN-80/G-04511,
- zawartość popiołu metodą powolnego spopielenia, polegającą na całkowitym spalaniu i wyprażeniu próbki w piecu ogrzewanym do temperatury 815°C – według PN-80/G-04512,

- zawartość części lotnych metodą polegającą na ogrzewaniu próbki bez dostępu powietrza w ściśle określony sposób w piecu ogrzonym do temperatury 850°C – według PN-81/G-04516,
- ciepło spalania – według PN-ISO 1928:2002,
- wartość opałową – według PN-ISO 1928:2002.

W ramach przeprowadzonej analizy elementarnej w badanym paliwie oznaczono:

- zawartość pierwiastków C, H, N – analizę wykonano w aparacie VarioEl firmy Elementar Analysensysteme GmbH; metoda polega na katalitycznym spalaniu próbki w wysokiej temperaturze (1150°C),
- w gazach wydzielonych w bombie kalorymetrycznej po spalaniu paliwa (po zaabsorbowaniu w roztworach pochłaniających) chlorki i fluorki metodą chromatografii jonowej na chromatografie IC HIC – 6 SHIMADZU.

Otrzymane wyniki zebrano w tab. 1.

Tabela 1. Analiza techniczna i elementarna stosowanego paliwa

Table 1. The technical and elementary analysis of the fuel in use

Parametr	Oznaczenie	Rodzaj badanego paliwa	
		słoma	drewno opałowe
<b>Analiza techniczna</b>			
Zawartość wilgoci	$W^a$ [%]	8,09	7,42
Zawartość popiołu	$A^a$ [%]	5,74	0,71
	$A^d$ [%]	2,24	0,77
Zawartość części lotnych	$V^a$ [%]	67,79	76,84
	$V^{daf}$ [%]	78,67	83,64
Ciepło spalania	$Q_s^a$ [kJ/kg]	17,000	18,139
Wartość opałowa	$Q_i^a$ [kJ/kg]	15,567	16,742
<b>Analiza elementarna</b>			
Zawartość węgla	$C^a$ [%]	42,43	40,52
	$C^{daf}$ [%]	49,24	44,57
Zawartość wodoru	$H^a$ [%]	5,66	5,22
	$H^{daf}$ [%]	6,57	5,74
Zawartość azotu	$N^a$ [%]	0,898	0,51
	$N^{daf}$ [%]	1,042	0,56
Zawartość siarki całkowitej	$S_t^a$ [%]	0,05	0,08
	$S_t^d$ [%]	0,06	0,09
Zawartość chlorków	$Cl^-$ [%]	0,029	0,021
Zawartość fluorków	$F^-$ [%]	0,00004	0,0007

## 4. Metodyka badań

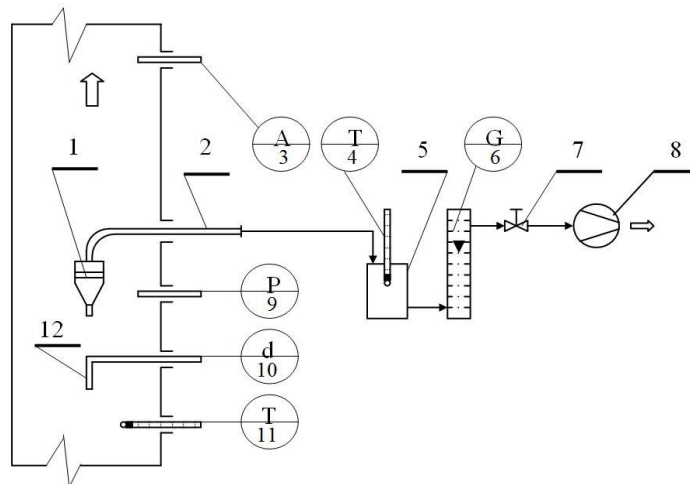
### Pomiar stężenia pyłu

Układ do pomiaru stężeń pyłu zastosowany w pomiarach został zbudowany zgodnie z PN-Z-04030-7:1994. Składał się on z sondy pyłowej (rys. 3.) oraz pompki i rotametu (manometru).



Rys. 3. Widok sondy aspiracyjnej (pyłowej)

Fig. 3. The dust aspiration tube view



Rys. 4. Schemat układu do pomiarów unosu i/lub emisji pyłu: 1 – separator pyłu, 2 – sonda aspiracyjna, 3 – analizator gazu, 4 – pomiar temperatury gazu w wykraplaczu, 5 – wykrapacz, 6 – pomiar częściowego strumienia gazu, 7 – zawór regulacyjny, 8 – pompa, 9 – pomiar ciśnienia statycznego, 10 – pomiar ciśnienia dynamicznego, 11 – pomiar temperatury gazu w kanale, 12 – rurka spiętrzająca

Fig. 4. Layout diagram for measuring float and/or emission of dust: 1 – dust separator, 2 – sampling line, 3 – gas analyzer, 4 – measurement of gas temperature in condenser, 5 – condenser, 6 – measurement of gas partial flow, 7 – control valve, 8 – pump, 9 – static pressure measurement, 10 – dynamic pressure measurement, 11 – temperature measurement, 12 – impact tube

Na rysunku 4. przedstawiono schemat układu do pomiarów unosu i/lub emisji pyłu z procesu spalania, przy czym:

- 1) pomiar stężenia pyłu jest wykonywany metodą filtracji wewnętrznej z zachowaniem izokinetyczności poboru próbki,
- 2) stopień zwilżenia gazu jest mierzony metodą kondensacyjną,
- 3) pomiar częściowego strumienia gazu jest wykonywany rotametrem,
- 4) pomiar głównego strumienia gazu jest wykonywany rurką spiętrzącą z mikromanometrem.

### Pomiar stężeń zanieczyszczeń gazowych

Układ do pomiaru stężeń zanieczyszczeń powietrza zastosowany w ramach prowadzonych badań został oparty na:

- analizatorze HORIBA PG-250,
- analizatorze MEXA-554GE.

Układ z zastosowaniem analizatora PG-250 składał się z: rurki probierczej, gorącej linii, kondycjonera gazów, analizatora PG-250, rejestratora (PC). Metody oznaczania poszczególnych kontaminantów analizatorem PG-250 zestawiono w tab. 2.

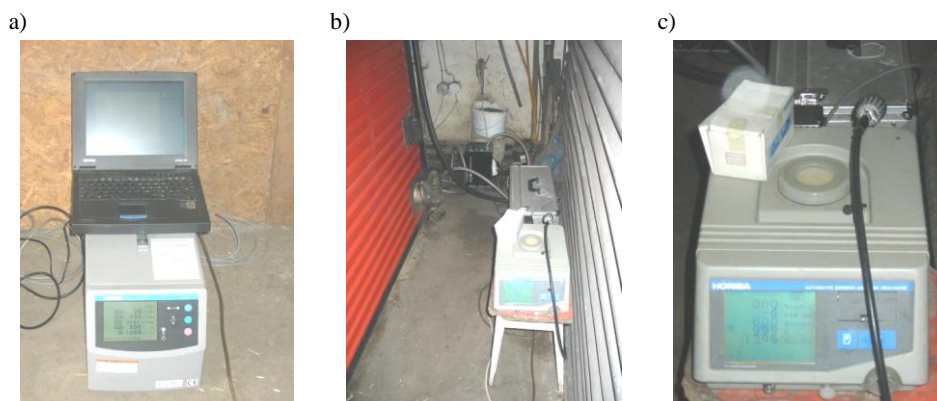
Tabela 2. Metody oznaczania poszczególnych związków automatycznym analizatorem PG-250

Table 2. Methods for the determination of individual compounds by PG-250 automatic Analyzer

Wielkość mierzona	Metoda oznaczania	Procedura badawcza
NO <sub>x</sub>	chemiluminescencja	PN-EN 14792:2006
SO <sub>2</sub>	podczerwień	PN-ISO 10396:2001
CO	podczerwień	
CO <sub>2</sub>	podczerwień	
O <sub>2</sub>	paramagnetyczna	PN-EN 14789:2006

Układ z zastosowaniem analizatora pracującego w podczerwieni typu NDIR MEXA-554GE składał się z: rurki probierczej i przewodu doprowadzającego gazy do analizatora, analizatora wraz z rejestratorem. Wielkości mierzone za pomocą analizatora to stężenia CO oraz sumy węglowodorów. Widok obydwu analizatorów przedstawiono na rys. 5.

Zastosowanie analizatora MEXA-554GE do pomiaru stężeń zanieczyszczeń w gazie miało charakter pomocniczy. Mierzono nim stężenia CO wykraczające poza zakres pomiarowy analizatora podstawowego (HORIBA PG-250) oraz stężenia sumy węglowodorów w chwilach niepełnego dopalania produktów zgazowania w kotłach.



Rys. 5. Widok analizatorów automatycznych użytych w badaniach: a) analizator HORIBA PG-250 wraz z rejestratorem PC, b, c) analizator MEXA-554GE w układzie pomiarowym

Fig. 5. View the automatic analyzers view applied in researches: a) HORIBA PG-250 analyzer with PC recorder, b, c) MEXA 554GE analyzer measuring system

## 5. Wyniki i dyskusja

Po zakończeniu aspiracyjnego poboru pyłu na sączki próby osuszono, a następnie poddano analizie wagowej. Rejestrując przepływ spalin w czopuchu, przeliczono stężenie pyłu na umowne  $\text{m}^3$ . Wyniki pomiarów zapylenia oraz temperatury gazów dla cykli pomiarowych zestawiono w tab. 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów zapylenia i temperatury spalin za kotłem

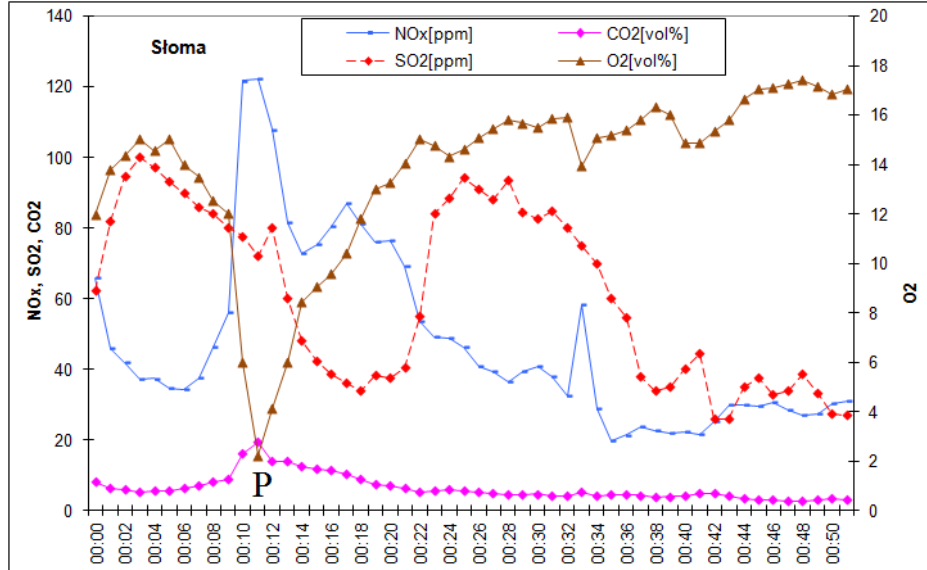
Table 3. Results of dust and temperature measurements in fumes

Rodzaj spalanego paliwa	Stężenie pyłu [ $\text{mg}/\text{um}^3$ ]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Słoma	109,3	243,5
Drewno	48,0	286,0

Obserwuje się znaczącą różnicę w stężeniu pyłu, która jest wynikiem różnicy charakterystyk w zawartości popiołów lotnych pochodzących z paliwa. W wyniku przeprowadzonych pomiarów spalania słomy i drewna otrzymano szeregi czasowe stężeń poszczególnych zanieczyszczeń, które przedstawiono na rys. 6. i 7.

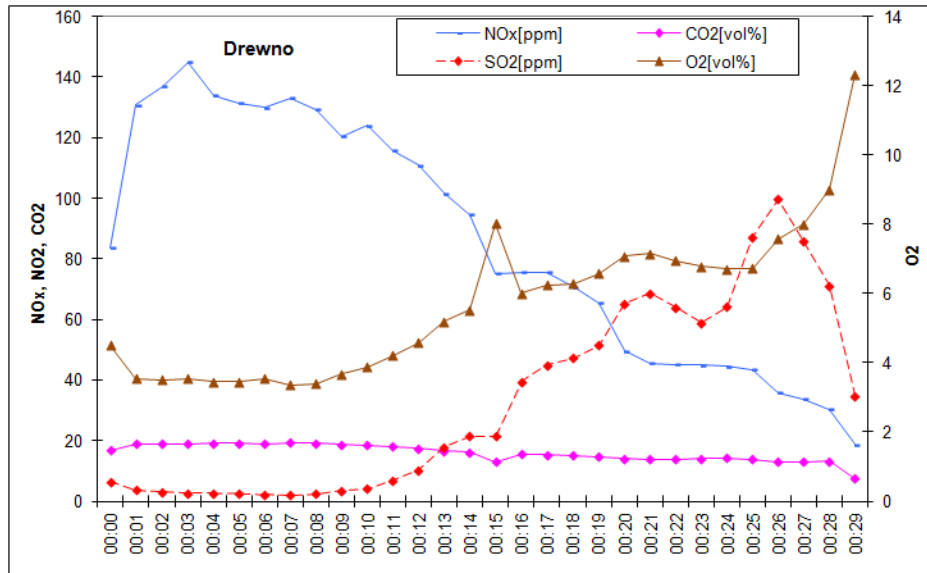
Sprawność kotła wyznaczono metodą pośrednią na podstawie określenia sumy strat [2], która wynosiła dla testu spalania słomy 63%, dla testu spalania drewna opalowego – 58%.

Ze względu na zastosowanie w kotłach strefy dopalania gazów oczekiwano niższego poziomu stężeń CO. Skala pomiarowa analizatora HORIBA PG-250, którego górna granica detekcji wynosi 6000,0 ppm CO, nie obejmowała całego



Rys. 6. Stężenia substancji w spalinach z procesu spalania słomy w funkcji czasu, *P* – punkt charakteryzujący zjawisko przewалу słomy wewnątrz komory spalania

Fig. 6. Substances concentration in the exhausts during straw combustion process in time function, *P* – characteristic point of straw fall inside the combustion chamber



Rys. 7. Stężenia substancji w spalinach z procesu spalania drewna opałowego w funkcji czasu

Fig. 7. Substances concentration in the exhausts during firewood combustion process in time function

przebiegu stężeń kontaminantu. W momentach przekroczenia wartości granicznej posiłkowano się analizatorem MEXA-554GE rejestrującym chwilowe odczyty. Jednak wyniki te nie dają całkowitego poglądu na przebieg utleniania CO do CO<sub>2</sub> w komorze dopalania. Dynamika zmienności stężeń CO w spalinach oraz ich amplituda (najwyższe obserwowane stężenie chwilowe to 25000 ppm CO) świadczą o trudnościach w ustabilizowaniu pracy kotła, a także sterowaniu procesem spalania. Średnie stężenie, wyodrębnione z okresu charakterystycznego dla procesu spalania, eliminując epizody zaburzające (rozpalanie, przewał, przyducha, wygaszanie itd.), rejestrowano na poziomie 4500 ppm CO przy stężeniu tlenu powyżej 13%.

## 6. Podsumowanie

Powszechnie spotykane kotły wsadowe charakteryzują się skromnym układem sterowania procesem spalania. Zasadniczym elementem podlegającym regulacji jest strumień doprowadzania powietrza, czyli regulacja obrotów pracy wentylatora nadmuchowego w zależności od cyklu i fazy pracy kotła. Często kotły wsadowe pracują ze stałą wydajnością wentylatora niezależnie od masy paliwa w komorze. Obserwuje się więc rosnący trend przebiegu stężenia tlenu w czasie spalania wsadu paliwa.

Charakterystyką tego typu jednostek jest cykliczna praca spalania pojedynczego wsadu materiału palnego w czasie. Aby optymalnie wykorzystać ciepło pochodzące z kotła wsadowego, stosuje się bufor ciepła, który stanowią zbiorniki akumulacyjne. Z jednej strony efektywnie odbierają ciepło, które wynika z możliwości cieplnych jednostki zasilającej, dostosowania dystrybucji i przekazania do układów w czasie jego rozbioru, z drugiej tworzą zabezpieczenie eksploatacyjne, uniemożliwiające wychłodzenie kotła i nadmierne rosenie wynikające ze spalania wilgotnego wsadu. Jest to aspekt zabezpieczenia układu przez nadmierną korozją, ale również ograniczenia emisji szkodliwych substancji do powietrza atmosferycznego.

Podczas testów w cyklach zaobserwowano spadkową tendencję poziomu stężenia NO<sub>x</sub> w czasie, czemu towarzyszy zmniejszanie natężenia procesu zgazowania biomasy. W tym okresie stopniowo zmniejsza się ilość paliwa w komorze, zwiększa się zaś ilość tlenu nadmiarowego, a przy tym zaobserwowano spadek temperatury w komorze. Te dwa czynniki mają przeciwstawny wpływ na tworzenie się NO<sub>x</sub>. Z tego wynika, że spadek temperatury ma większy wpływ na obniżanie stężenia NO<sub>x</sub> w komorze niż wzrost ilości tlenu. Również ze względu na temperaturę, w jakiej jest przeprowadzany proces spalania (w badanym kotle ok. 600÷700°C), autor jest skłonny stwierdzić, że tlenki azotu pochodzą z zawartości azotu w paliwie (tzw. tlenki azotu pochodzenia paliwowego); nie są to tlenki azotu pochodzenia termicznego.

Proces spalania słomy nie jest procesem równomiernym i ma charakter stopniowy. W trakcie wypalenia materiału w dolnej części kotła następuje osu-

nięcie materiału wyżej zgromadzonego, co przyczynia się do wystąpienia chwilowego zjawiska niedoboru tlenu, często nazywanego „przyduchą”. Przykładem omawianego zjawiska jest wystąpienie przewału słomy wewnątrz komory, zarejestrowanego i przedstawionego na rys. 6. Chwilowy niedobór tlenu i zaburzenie strugi płomienia wywołuje chwilowy wzrost stężenia niedopalonych produktów w gazach spalinowych.

Proces dopalania produktów niepełnego spalania jest złożony, lecz ze względu na niezadowalające utlenienie CO wymaga rozwiązania. Kotły małej mocy mają konstrukcję zwartą, dlatego utrudnieniem jest wygospodarowanie dodatkowej przestrzeni spełniającej rolę komory dopalania. Z tego powodu tego typu jednostki są trudne do projektowania i optymalizacji procesu spalania w aspekcie ograniczenia emisji zanieczyszczeń do powietrza. Należy rozważyć również modyfikację systemu dozowania powietrza wtórnego, polegającą na zastosowaniu wydłużonej drogi lub wprowadzaniu powietrza trzeciego stopnia.

## Literatura

- [1] Janicki M., Lech-Brzyk K.: Biomass combustion in low-power boilers on example of KD type boiler. *Alternative Plants For Sustainable Agriculture*, Institute of Plant Genetics, Polish Academy of Sciences, Poznań 2006, pp. 195-201.
- [2] Kruczek S.: Kotły. Konstrukcje i obliczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [3] Kordylewski W.: Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [4] Ślęzko M., Zieliński H.: Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze-Kraków 2003.
- [5] Stelmach S., Pikoń K. i in.: Współczesne problemy energetyki. Wydaw. Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, Gliwice 2013.

*Wykonano w ramach realizacji projektu nr 14-0016-10 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

## THE PRIMARY CONCENTRATION OF POLLUTANTS IN THE EXHAUST GASES RESULTING FROM COMBUSTION OF STRAW AND WOOD IN LOW-POWER BATCH BOILER

### Summary

The most prevalent in the country and thus most commonly used in thermal low power systems are batch boilers. They are most commonly used for heating and for the preparation of domestic hot water in the households of the distributed development. These units are characterized by a high energy inertia affecting the stability of the combustion process. In addition, the combus-

tion of fuels in low power boilers is using fuels with high diversification of technical and elementary parameters, and the economic aspect is to households getting frequent determinant of form and quality of burned fuel, regardless of the boilers in which fuel is converted into heat. These circumstances are conducive to the formation of elevated pollutant loads, as well as dust and gas, entering the environment. This is how the low dispersed emission contributes to a variety of risks, including, increasingly, the appreciable nature of the smog, which is why it is extremely important to the develop low-emission and highly efficient technology of fuels combustion in low power boilers.

This article presents the emission characteristic of Ekopal RM boiler with a capacity of 30 kW during combustion of pressed straw and wood pieces. The characteristic of the combustion fuel is shown by the analysis of the chemical and physical composition. Emission tests were used with pressed cereal straw with dimensions 0,4 x 0,4 x 0,9 m (six batch) and oak stocks with a length of 0,55 m. The results are presented in the form of the time series of concentration of gas substances and silt fraction levels measured on the flue and have been discussed.

**Keywords:** biomass combustion, technical and elemental analysis of fuel, grain straw, firewood, measuring system, concentration of pollutants

DOI:10.7862/rb.2013.56

*Przesłano do redakcji: 10.10.2013 r.*

*Przyjęto do druku: 13.11.2013 r.*