

Andrzej J. Wandrasz

Ocena właściwości emisyjnych paliw z odpadów

W określonych warunkach termicznych każda substancja palna ulega rozkładowi (piroliza), a w wypadku obecności tlenu – częściowemu lub całkowitemu utlenieniu (zgazowanie lub spalanie). Podobnie jak spalanie substancji w określonych – umownych – warunkach pozwala wyznaczyć jego wartość energetyczną, tj. entalpię (ciepło) spalania, a na jego podstawie wyznaczyć wartość opałową, tak prowadzenie procesu spalania w określonych – powtarzalnych – warunkach, odniesionych do procesu rzeczywistego, daje możliwość określenia porównywalnej emisji produktów gazowych procesu spalania [3].

O właściwościach paliwa w komorze spalania decyduje cały szereg czynników bezpośrednio z nim związanych, a także czynników zewnętrznych związanych z organizacją procesu spalania. Wiadomo, że nie każdym paliwem można opalać każdy piec w sposób efektywny i gwarantujący spełnienie wymaganych warunków emisyjnych. Zapewnienie odpowiedniego stosunku nadmiaru powietrza również nie gwarantuje uzyskania odpowiedniej jakości spalania, bowiem rozprządzenie tlenu w komorze (powietrze pierwotne, wtórne, trzecie) i jego kontakt z paliwem wymaga spełnienia wielu ważnych warunków, których nie można określić stechiometrycznie. Kształt komory spalania, rozmiar przestrzeni martwych, układ powierzchni wymiany ciepła, kierunek ruchu materiału i powietrza w stosunku do spalin, rozkład prędkości strug gazów i wymiana ciepła w sposób decydujący wpływają na końcowy efekt procesu. Ponadto często myli się pojęcia procesu termicznego unieszkodliwiania substancji spalanej z procesem oczyszczania spalin, uznając go za dominujący czynnik ograniczenia emisji substancji szkodliwych, podczas gdy sorpcja, nie połączona z konkretną reakcją chemiczną, jest procesem przeniesienia obciążenia środowiska z oddziaływania emisji gazowej rozproszonej na znacznych przestrzeniach na emisje cieczy lub ciał stałych skumulowanych w określonych elementach środowiska.

Wytwarzane paliwa, w zależności od stopnia przetworzenia i sposobu prowadzenia operacji technicznych i technologicznych, uzyskują zróżnicowane kształty [1]. Odpady surowe lub biomasa (składnik odpadów komunalnych), jako materiał palny odzyskany w wyniku procesu sortowania, stanowi zbiór substancji, w skład których wchodzi materiały o zróżnicowanym – trudno identyfikowalnym – kształcie i wymiarach poszczególnych ziaren, a także kształtach poszczególnych cząstek.

Zawartość wilgoci jest jednym z podstawowych parametrów określających przydatność paliwa do celów technicznych. Wilgoć w sposób istotny wpływa na kaloryczność paliwa i odgrywa znaczącą rolę w procesie spalania. Nie bez znaczenia wielkość ta określana jest również przy ocenie

możliwości sprzedaży i składowania paliwa. Wilgoć zawarta jest w materiałach porowatych (drewno, papier, tekstylia, substancje organiczne i inne) w dużych porach (w postaci pary) oraz kapilarach (w postaci cieczy).

Odrębnym problemem jest gęstość masy paliwa, któremu to zagadnieniu poświęcono w pracy [1] wiele miejsca, rozróżniając wiele pojęć związanych z tą wielkością. W zastosowaniu do omawianych paliw w grę wchodzi gęstość nasypowa, definiowana jako stosunek masy do objętości swobodnie wypełnionego pojemnika.

W odniesieniu do paliw peletowanych lub brykietowanych w grę wchodzi także zagadnienia wytrzymałościowe, mające istotny wpływ na zachowanie się paliwa w palenisku (rozkruszanie, rozłamywanie i deformowanie), przy czym rozróżnia się tu pojęcia ścieralności i twardości. Do ważnych parametrów zaliczyć także należy zdolność do pochłaniania wilgoci, określaną sorpcyjnością materiału. Większość materiałów wchodzących w skład paliw z odpadów ma strukturę kapilarną i właściwości higroskopijne, pochłaniając wilgoć z powietrza lub oddając go do otoczenia, zależnie od wielu czynników. Zmiany zawartości wilgoci w materiale, w odniesieniu do wilgotności względnej powietrza można przedstawić graficznie w postaci izotermy sorpcji. W procesie pochłaniania wilgoci przez materiał porowaty uczestniczą dwa zjawiska, tj. adsorpcja zachodząca na powierzchni rozwiniętej materiału oraz absorpcja, polegająca na pochłanianiu pary przez warstwę cieczy w przestrzeniach kapilar. Odrębną wielkością związaną z sorpcją wilgoci jest pęcznienie. Materiał rozdrobniony może po pochłonięciu wilgoci zwiększyć swoją objętość o 20+30%. Pęcznienie materiału określane jest współczynnikiem pęcznienia sorpcyjnego.

W wypadku długiego okresu składowania paliwa uzyskanego z odpadów może zachodzić obawa wzrostu aktywności biologicznej jego składników organicznych. Istnieje możliwość rozwoju pleśni, a także grzybów. Badania przeprowadzone po okresie 2-miesięcznego magazynowania paliwa (pelety) nie wykazały żadnych istotnych zmian substancji składowanej w temperaturze otoczenia, a rozwój pleśni w analizowanym materiale nastąpił dopiero po 8 miesiącach [1].

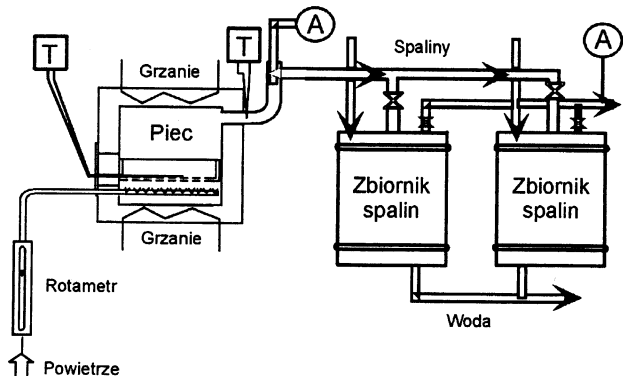
Konieczność prowadzenia badań nad emisyjnością próbek spalanego paliwa – zarówno samego, jak i zmieszanego z węglem energetycznym – wynika z podstawowego pytania o wpływ tych paliw na przebieg procesu spalania w komorze paleniskowej. Istotą jest odpowiedź na pytanie, czy paliwa te wnoszą zmiany w procesie spalania i wpływają na pogorszenie przebiegu procesu podstawowego? Wielość warunków decydujących o przebiegu procesu spalania, takich jak wpływ i sposób zasilania komory, parametry i rozkład temperatur w komorze, warunki wymiany ciepła, hydrodynamika przepływu gazów, różnorodny skład i granulacja mieszanek, stosunek nadmiaru powietrza, czy też szybkość próbkowania

i jego wpływ na wyniki badań – czyni badania bardzo skomplikowanymi, a ich wyniki trudne do jednoznacznego opisu matematycznego [4]. Z drugiej strony wydaje się ważne, aby uzyskać wskaźnik porównawczy, pozwalający ocenić zachowanie się różnych paliw w takich samych warunkach termicznych w eksperymentalnej komorze paleniskowej. Badania można prowadzić realizując dwa procesy, tj. komorowy i fluidalny. Proces fluidalny – z uwagi na specyfikę wymiany masy i ciepła w takim reaktorze – wymaga odrębnego omówienia i odrębnych warunków prowadzenia eksperymentu. Dla paliwa, którego skład chemiczny został wcześniej określony, analizuje się emisję CO i NO_x (NO), jako gazów reprezentujących przebieg procesu spalania. Wraz ze wzrostem udziału CO rosnąć będzie emisja węglowodorów, co pozwala tę wielkość traktować jako wskaźnik jakości procesu spalania. Udział NO_x wynika z sumy tlenków (paliwowych i syntezowych) i również jest reprezentantem właściwości danego rodzaju paliwa w określonych warunkach procesu spalania [2].

Materiał i metodyka badań

Do przeprowadzenia badań emisji gazów w procesie spalania mieszanek paliwowych zastosowano elektryczny piec komorowy z wbudowaną gazoszczelną wymienną retortą w miejsce drzwiczek zamykających. Komora pieca została tak skonstruowana, aby uniemożliwić dostęp powietrza fałszywego, a jedynie mierzoną, określoną warunkami eksperymentu, jego ilość, dostarczaną specjalnym układem podawania powietrza. Retortę wyposażono w układ grzania (maks. do temp. 1100 °C), z nastawną i regulowaną temperaturą przebiegu procesu. Po ustabilizowaniu warunków termicznych (temperatura w komorze jest wielkością zadaną) do retorty wprowadza się odważoną próbkę paliwa na specjalnej szufladzie z rusztem. Ruszt wykonano w postaci perforowanej płaskiej płyty żaroodpornej o takiej liczbie otworów, aby opór przepływu był jak najmniejszy i pozwalał na uzyskanie równomiernego zasilania powietrzem całego przekroju. W czołowej płycie szuflady umieszczono otwory, przez które wprowadzono termoelementy rejestrujące zmiany temperatury w badanej próbce.

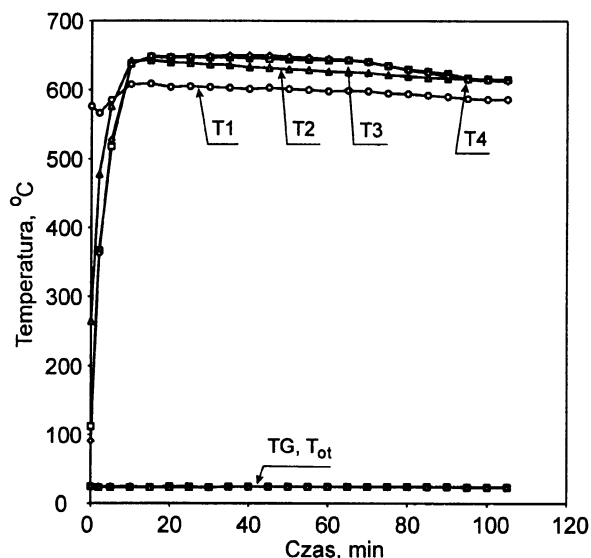
Do pomiaru składu produktów gazowych procesu spalania wykorzystano analizator spalin MADUR GA-40 T Plus (a także jego nowsze generacje), rejestrujący skład gazów spalinowych, tj. CO, CO₂, SO₂, O₂, NO i NO_x, z częstotliwością próbkowania wynoszącą 2 s. Na rysunku 1 pokazano schemat stanowiska badawczego z komorą spalania.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do pomiaru emisyjności spalin

W prezentowanym układzie pomiarowym spaliny zasysane były specjalnym układem zbiorników o dużej pojemności, znacznie przewyższającej pojemność komory spalania. Podciśnienie w układzie regulowane było wpływem wody, którą przed rozpoczęciem eksperymentu napełniono oba zbiorniki, a w wypadku dłuższego okresu trwania eksperymentu była możliwość odwrotnego napełniania i opróżniania zbiorników.

Pomiar składu gazu dokonywany był bezpośrednio w kanale spalinowym, a także w zbiornikach po określonym czasie ich napełniania. W ten sposób wyznaczono wartości chwilowe udziału badanego składnika lub jego wartość średnią w określonym przedziale czasu. Masa próbki spalanej substancji była tak dobrana, aby w trakcie procesu spalania nie nastąpił gwałtowny przyrost temperatury komory reaktora, maksymalnie $\pm 10\%$ wartości zadanej temperatury wygrzanej komory. Proces spalania przebiegał przy stałej zadanej ilości powietrza, dla prezentowanych wyników określonej średnim stosunkiem nadmiaru powietrza w przedziale $\lambda = 1,40 + 1,96$. Wartość λ w trakcie przebiegu procesu ulegała zmianom, bowiem wraz z upływem czasu i wypaleniem substancji organicznej stały strumień doprowadzanego powietrza powodował wzrost tej wartości. Jednakże przyjęcie umownych warunków prowadzenia procesu, takich samych dla każdej z badanych substancji, pozwoliło na porównanie wyników badań. Przyrosty temperatur były mierzone zarówno w komorze, jak i w samej próbce spalanej substancji. Na rysunku 2 pokazano przykładowy przebieg zmian temperatury w komorze spalania.



Rys. 2. Przykładowe zmiany temperatur w komorze (T1), próbki paliwa (T2-T4) i powietrza zasysanego do układu (TG) oraz temperatury otoczenia (T_{0t})

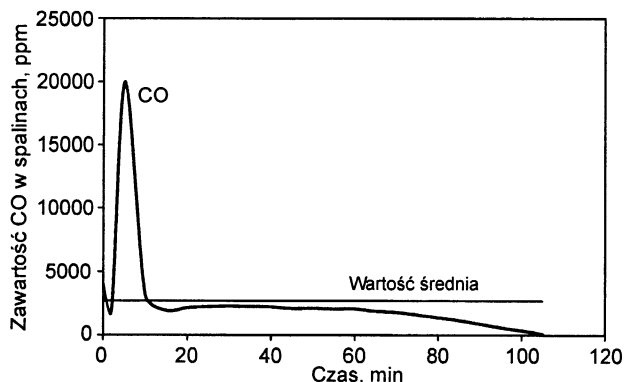
Pomiar udziału danego składnika w spalinach pozwalał na uzyskanie przebiegu zmian badanej wielkości w funkcji czasu. Możliwe było określenie maksymalnej wartości emisji chwilowej, a także jej wartości średniej. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wykres zmian udziału tlenku węgla podczas procesu spalania oraz jego wartość średnią.

Na wykresie widoczna jest wartość maksymalna – chwilowa – stężenia CO, możliwa do osiągnięcia w procesie spalania z wprowadzaniem do układu paliwa w sposób ciągły. Podobny kształt przebiegu krzywych wystąpił również dla innych badanych składników spalin. Proces uśredniania opierał się na

wyznaczeniu powierzchni pod krzywą w określonym przedziale czasu, zgodnie z zależnością:

$$\bar{u}_1 = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} u_1(\tau) d\tau \quad (1)$$

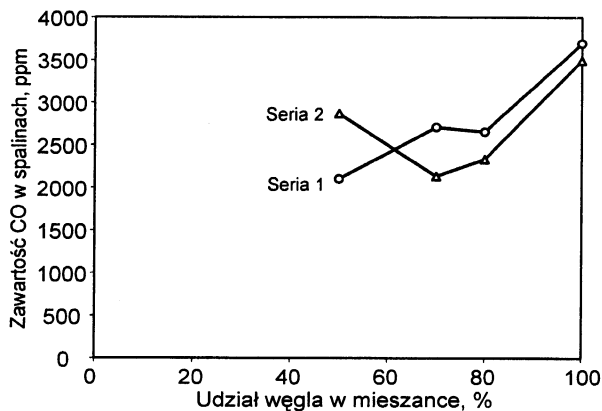
Dla porównania procesu spalania danego paliwa, przeprowadzono badania przebiegu spalania czystego węgla energetycznego, uznawanego za wzorzec, a także rozpatrywanego paliwa i jego mieszanek z węglem w założonych proporcjach.



Rys. 3. Przebieg zmian zawartości tlenku węgla w spalinach podczas badań

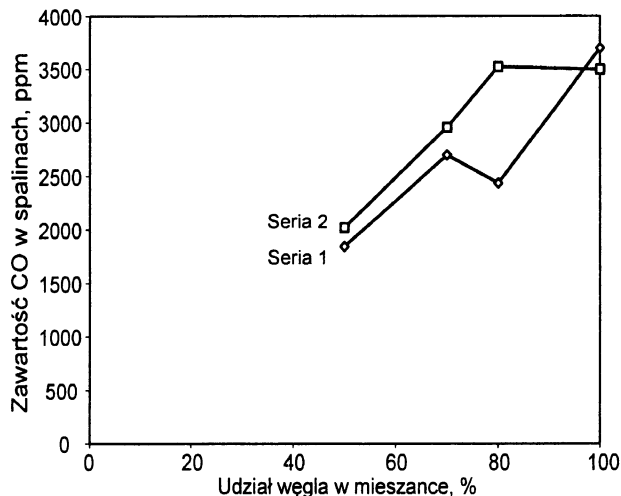
Dyskusja wyników

Poniżej zaprezentowano wybrane wyniki badań, ograniczone do wartości średnich danego pomiaru, przy czym pełne dane oraz ich omówienie zawarte są w pracy [1]. Na rysunku 4 pokazano wpływ dodatku drewna na warunki spalania węgla. Widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem udziału drewna w mieszance uległ zmniejszeniu udział CO w spalinach, co związane było z obecnością tlenu i wodoru w paliwie. Oba te składniki spowodowały znaczny spadek udziału CO w spalinach i efektywniejszy przebieg procesu spalania.



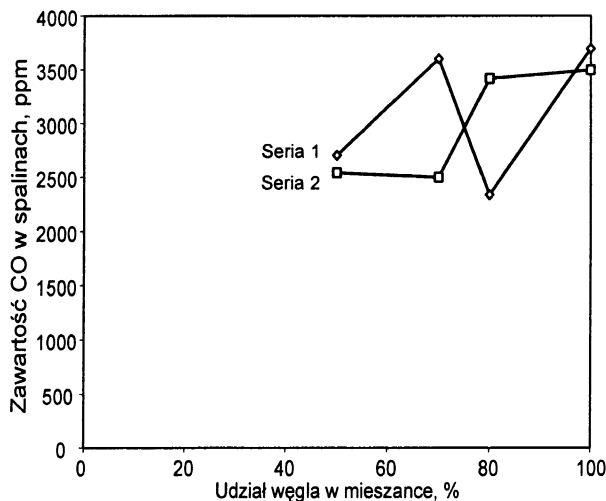
Rys. 4. Wpływ dodatku drewna na emisję CO w procesie współspalania z węglem

Podobny wpływ na przebieg procesu spalania miał dodatek papieru do węgla. Stosowane mieszanki papieru i węgla w proporcjach od 0:1 do 1:1 pozwoliły na uzyskanie średnich udziałów tlenku węgla w spalinach (rys. 5), przy czym widać wyraźny wpływ dodatku papieru na zmniejszenie udziału CO w spalinach.



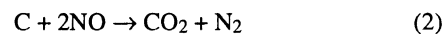
Rys. 5. Wpływ dodatku papieru na emisję CO w procesie współspalania z węglem

Dodatek tworzyw sztucznych (PP) nie wnoszących tlenu w cząsteczce, lecz powodujących znaczne podwyższenie lokalnej temperatury spalania, w mniejszym stopniu niż pozostałe substancje wpłynęły na obniżenie udziału CO w spalinach (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ dodatku tworzyw sztucznych na emisję CO w procesie współspalania z węglem

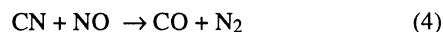
W odniesieniu do udziału tlenków azotu w spalinach wpływ dodatku różnych składników był odwrotny. W grę zaczynają wchodzić tlenki paliwowe zwiększające łączny udział NO. Można w tym miejscu postawić pytanie o proces reburningu tlenków azotu, jednakże wprowadzona próbka charakteryzowała się w trakcie przebiegu procesu zmniejszającym się udziałem węgla pierwiastkowego, co ograniczało przebieg reakcji:



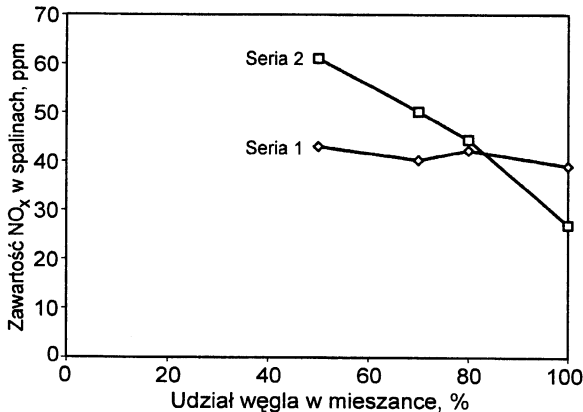
przy czym reakcja ta jest wynikiem przebiegu dwu pośrednich reakcji rodnikowych:



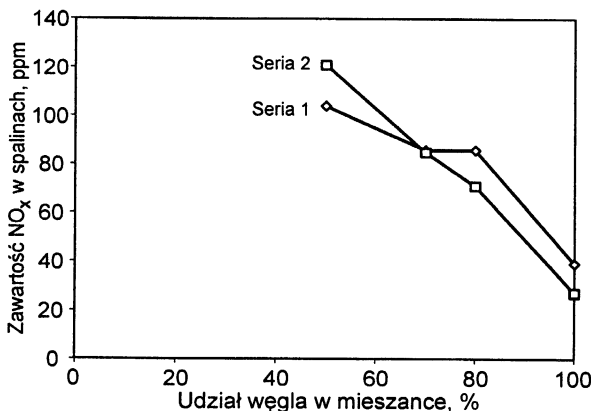
oraz



Zawartość tlenków azotu zależy od udziału azotu w paliwie (np. w drewnie 1,25%, w skórach 9,60%, w węglu 1,73%). Wpływ dodatku drewna na przebieg procesu tworzenia tlenku azotu pokazano na rysunku 7, natomiast wpływ dodatku skór na rysunku 8.

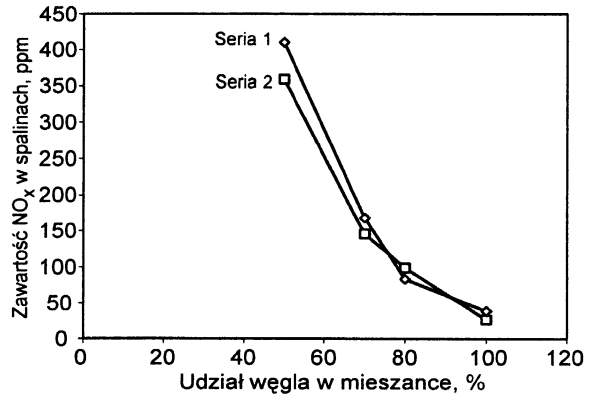


Rys. 7. Wpływ dodatku drewna na emisję tlenków azotu w procesie współspalania z węglem



Rys. 8. Wpływ dodatku skór na emisję tlenków azotu w procesie współspalania z węglem

Bardzo wyraźny wpływ na proces tworzenia tzw. tlenków syntezowych widoczny jest przy dodatku tworzyw sztucznych do spalane go węgla. W tym wypadku cząstki tworzywa o znacznie wyższej wartości opałowej (44,5 MJ/kg) pod wpływem doprowadzonego tlenu spalają się, powodując lokalne podwyższenie temperatury. Zjawisko to jest wyraźnie widoczne na rysunku 9, ilustrującym wpływ udziału tworzyw sztucznych na proces współspalania z węglem.



Rys. 9. Wpływ dodatku tworzywa sztucznego na emisję tlenków azotu w procesie współspalania z węglem

Podsumowanie

Zaproponowana metoda oceny właściwości paliw uzyskiwanych z odpadów daje możliwość wykazania ich wpływu na proces współspalania z węglem w procesach energetycznych. Jej dopracowanie pod względem porównywalnych warunków prowadzenia procesu daje możliwość podziału paliw pod względem ich zdolności emisyjnych i może stanowić podstawę ich kwalifikowania do danego procesu. Prowadzone dalsze prace badawcze nad zagadnieniem emisji w procesach współspalania różnego typu paliw z odpadów wraz z węglem wskazują na prawidłowość ocen i przydatność zaproponowanej metody.

LITERATURA

1. A. J. WANDRASZ: Badania i ocena możliwości wykorzystania wydzielonych składników odpadów komunalnych oraz innych odpadowych substancji organicznych do prefabrykacji paliw. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2001 (praca nie publikowana).
2. R. K. WILK: Podstawy niskoemisyjnego spalania. Wyd. Gnome, Katowice 2000.
3. J. W. WANDRASZ: Gospodarka odpadami medycznymi. PZITS, Poznań 2000.
4. J. W. WANDRASZ, D. KRÓL: Kontrola przebiegu procesu termicznej przeróbki odpadów. Ochrona Środowiska, 1999, nr 2, ss. 41–46.

Wandrasz, A. J. Assessing the Emission Properties of Fuels from Solid Wastes. *Ochrona Środowiska* 2003, Vol. 25, No. 1, pp. 39–42.

Abstract: The paper gives an account of methods for investigating the emission properties of solid fuels in order to assess the average emissions of CO and NO (under standard process conditions) as indicators of emission for a given type of fuel. For this purpose an experimental setup was designed and constructed to provide repeatable emissions and to enable assessment of the behavioral pattern in the hypothetical combu-

stion chamber for the fuel under test. The experimental results were related to the combustion of boiler coal and they confirmed the influence of some morphological components of the wastes on the presence of CO and NO in the flue gases. The two measured components provide information on the course of the combustion process so they can be adopted as the emissivity indicators for a given fuel. The account of methods is part of a comprehensive study.

Keywords: solid wastes, fuel, combustion process, emission properties, CO emission, NO emission.