

**Sebastian WERLE**

Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Techniki Ciepłej  
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice  
e-mail: sebastian.werle@polsl.pl

## Ocena możliwości wykorzystania gazów niskokalorycznych w technologiach ograniczania emisji substancji szkodliwych z procesów spalania

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesu reburningu z wykorzystaniem gazu ze zgazowania biomasy odpadowej w kotle węglowym małej mocy. Pokazano wpływ paliwa dodatkowego na emisję tlenków azotu, a także innych zanieczyszczeń: WWA i CO. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych określania normalnej prędkości spalania gazu ze zgazowania biomasy odpadowej jako parametru determinującego możliwość stabilnego współspalania z węglem. Wyniki pokazują, że ilość emitowanych tlenków azotu w wyniku dodatku paliwa gazowego do komory spalania zmalała o ponad 30%. Jednocześnie wyniki analiz pomiaru WWA w spalinach pokazują, że także sumaryczna ilość WWA jest znacznie większa przy spalaniu samego węgla niż przy współspalaniu z gazem ze zgazowania osadów ściekowych. W ramach przeprowadzonych badań określono również wpływ procesu spalania na emisję CO. Analizując wyniki, można stwierdzić, że przy zwiększaniu ilości dodatkowego paliwa do komory spalania stężenie tlenu węgla rośnie. Jest to zjawisko, które obserwuje się w przypadku większości instalacji niskoemisyjnego spalania. W zakresie wyników badań eksperymentalnych normalnej prędkości spalania stwierdzono, że uzyskane wartości dla analizowanego gazu ze zgazowania osadów ściekowych są zgodne z obliczeniami teoretycznymi, prezentowanymi we wcześniejszych pracach z tego zakresu. Wyniki te jednoznacznie wskazują, że istnieje optymalny zakres parametrów współspalania gazu ze zgazowania biomasy niekonwencjonalnej, przy których możliwe jest prowadzenie procesu reburningu.

**Słowa kluczowe:** osady ściekowe, gaz ze zgazowania, reburning, emisja CO, NO<sub>x</sub>, WWA, normalna prędkość spalania

### Wstęp

Spalanie paliw kopalnych stanowi główne źródło produkcji finalnych postaci energii (ciepła i elektryczności) w Polsce. Jest też, niestety, głównym źródłem emisji substancji szkodliwych, takich jak tlenki azotu NO<sub>x</sub>, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) i tlenek węgla CO. Istnieje wiele technik i technologii niskoemisyjnego spalania. Metody te w głównej mierze skupiają się na osiągnięciu niższych stężeń tlenków azotu z procesu spalania. Do tanich i efektywnych metod ograniczania tych związków zaliczyć należy reburning. Technika ta wykorzystuje mechanizm redukcji NO za pomocą przede wszystkim rodników węglowodorowych CH generowanych w wyniku dozowania dodatkowego paliwa do komory paleniskowej ponad strefę palnikową. Niestety, zastosowanie tej techniki może

powodować wzrost emisji innych zanieczyszczeń gazowych, jak tlenek węgla czy wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Jednym z parametrów, który istotnie wpływa na efektywne i niskoemisyjne współspalanie paliwa reburningowego jest normalna prędkość spalania.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesu reburningu z wykorzystaniem gazu ze zgazowania biomasy odpadowej w kotle węglowym małej mocy. Pokazano wpływ paliwa dodatkowego na emisję tlenków azotu, a także innych zanieczyszczeń: WWA i CO. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych określania normalnej prędkości spalania gazu ze zgazowania biomasy odpadowej jako parametru determinującego możliwość stabilnego współspalania z węglem. Ponadto określono wpływ procesu reburningu na emisję CO.

## 1. Materiały i metody

### 1.1. Produkcja gazu ze zgazowania

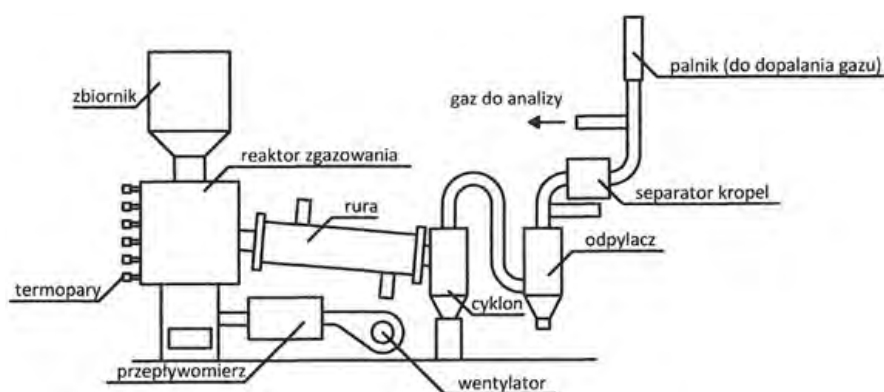
Przedmiot badań stanowiły osady ściekowe, które pochodziły z oczyszczalni ścieków zlokalizowanej w Polsce. Właściwości osadów ściekowych zostały przedstawione w tabeli 1. Osad pochodził z oczyszczalni mechaniczno-biologiczno-chemicznej z symultanicznym strącaniem fosforu. Po odwodnieniu osad był suszony w suszarce taśmowej przy użyciu gorącego powietrza o temperaturze 150°C. W końcowym efekcie powstały osad ma formę nieregularnie ciętych „makaroników” [1].

Tabela 1. Właściwości osadów ściekowych

Table 1. Sewage sludge properties

Parametr	Osad ściekowy
<i>Analiza techniczna, % wag. (stan roboczy)</i>	
Wilgoć	5,30
Części lotne	49,00
Popiół	44,20
<i>Analiza elementarna, % wag. (stan suchy)</i>	
C	27,72
H	3,81
N	3,59
O (jako różnica)	18,84
S	1,81
F	0,003
Cl	0,03
Wartość opałowa, MJ/kg (suchej masy)	10,75

Proces zgazowania osadów ściekowych prowadzono w reaktorze ze złożem stałym zaprojektowanym w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej [2]. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat instalacji do zgazowania osadów ściekowych

Fig. 1. Scheme of the installation for sewage sludge gasification process

Badany osad poddawano procesowi zgazowania przy użyciu powietrza jako czynnika zgazowującego o zmiennej temperaturze, stosując ilości czynnika odpowiadające zakresowi stosunku nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) od 0,12 do 0,27. Wyniki wpływu parametrów procesowych na parametry gazu ze zgazowania publikowano w pracy [3]. W tabeli 2 przedstawiono skład gazu ze zgazowania, który wykorzystano w dalszych badaniach.

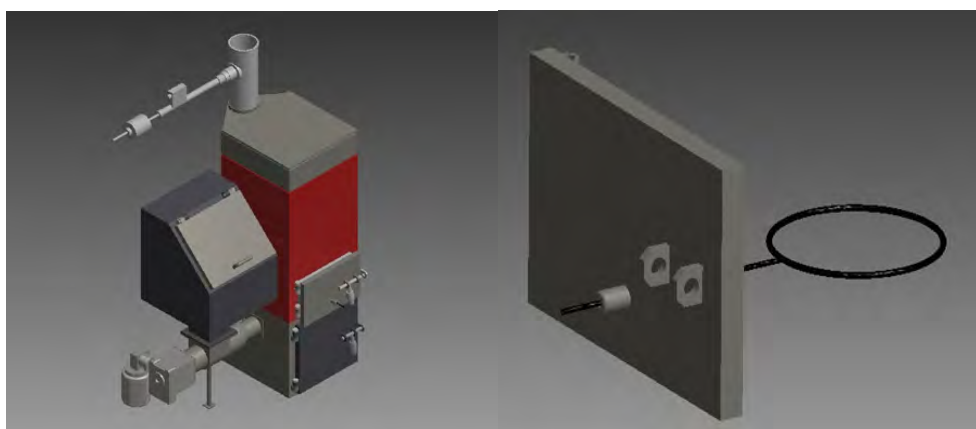
Tabela 2. Skład gazu ze zgazowania osadu ściekowego

Table 2. Composition of the sewage sludge gasification gas

Składnik	Udział objętościowy
CO	28,5
CO <sub>2</sub>	15,0
H <sub>2</sub>	5,0
CH <sub>4</sub>	1,0
N <sub>2</sub>	50,5

## 1.2. Współspalanie gazu ze zgazowania

Kocioł (rys. 2) użyty do badań jest węglowym wodnym kotłem firmy Urzón (Pszczyna, Polska) z paleniskiem retortowym o nominalnej mocy 25 kW, a paliwem podstawowym kotła jest węgiel kamienny sortymentu groszek. Właściwości węgla przedstawiono w tabeli 3. Modernizacja kotła na potrzeby dodatkowego spalania gazu polegała na zmianie konstrukcji drzwiczek komory paleniskowej oraz na wprowadzeniu do wnętrza komory specjalnego profilu stalowego, przez który doprowadzano gaz powstały w zgazowarce o składzie podanym w tabeli 2. Wprowadzenie gazu w strefę bezpośredniego spalania węgla w retorcie [4] odbywa się poprzez profil z nawierconymi otworami (średnica wewnętrzna  $\phi = 3$  mm, 25 sztuk).



**Rys. 2. Kocioł wykorzystany do badań**  
**Fig. 2. Boiler used during the investigation**

**Tabela 3. Analiza składu węgla kamiennego**  
**Table 3. Analysis of the hard coal composition**

<i>Analiza techniczna, % wag. (stan roboczy)</i>	
Wilgoć	9,30
Zawartość części lotnych	30,60
Popiół	4,30
Stała część palna	55,80
<i>Analiza elementarna, % wag. (w stanie suchym)</i>	
C	72,36
H	4,34
N	1,35
O (jako różnica)	21,59
S	0,36
Wartość opałowa, MJ/kg (w stanie suchym)	29,20

**Tabela 4. Metodyka pomiarowa**  
**Table 4. Experiment methodology**

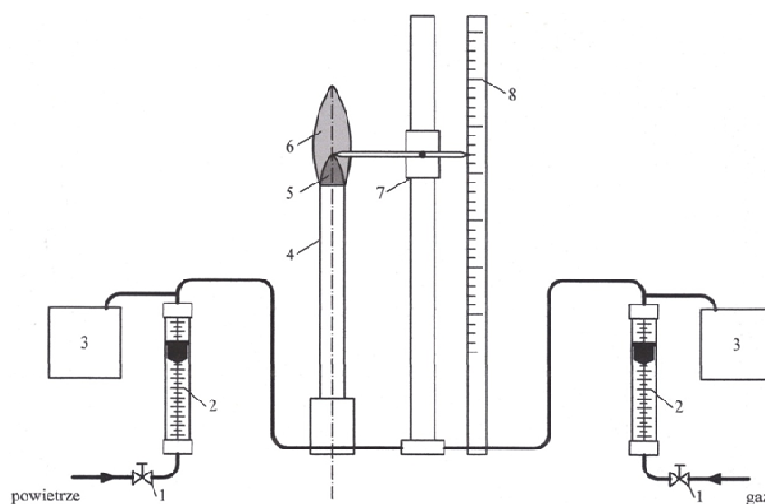
Strumień węgla kg/h	Strumień gazu $m_n^3/h$	Energia gazu w energii chemicznej paliwa %	Stosunek nadmiaru powietrza –
2,48	0	0	2,06
2,48	0,47	3	2,29
2,48	0,77	5	2,21
2,48	0,93	6	2,22
2,48	1,12	7	2,20
2,48	1,40	8	2,25
2,48	1,86	11	2,01

Eksperyment został przeprowadzony w dwóch etapach. Etapem pierwszym była analiza spalin podczas spalania samego węgla. Etap drugi polegał na analizie spalin podczas spalania takiej samej masy węgla z dodatkiem gazu reburningowego. Tabela 4 przedstawia metodykę pomiarową z zaznaczoną informacją o strumieniu

gazu i węgla kamiennego oraz jaką część energii chemicznej paliwa doprowadzanego do komory spalania stanowił gaz.

### 1.3. Określanie normalnej prędkości gazu ze zgaszania

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody palnika Bunsena [5]. Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska. Główną częścią stanowiska pomiarowego jest palnik z wymiennymi końcówkami (zmienna średnica wylotowa  $D_1$  i  $D_2$ ), do którego nasady za pomocą dwóch oddzielnych przewodów doprowadzono gaz i powietrze. Stanowisko jest również wyposażone w dwa zawory i dwa rotametry (osobne dla powietrza i gazu). Dzięki zaworom można zmieniać objętościowe natężenie przepływu powietrza i gazu. Natomiast rotametry pozwalają na pomiar strumieni powietrza i gazu. Liniał wraz z przesuwным wskaźnikiem ze statywem umożliwia określenie wysokości wewnętrznego, kinetycznego stożka spalania.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego; 1 - zawory, 2 - rotametry, 3 - manometry, 4 - palnik, 5 - wewnętrzny, kinetyczny stożek spalania, 6 - zewnętrzny, dyfuzyjny stożek spalania, 7 - statyw z przesuwным wskaźnikiem, 8 - liniał

Fig. 3. Scheme of the installation; 1 - valves, 2 - rotameters, 3 - manometers, 4 - burner, 5 - inner combustion (kinetic) cone, 6 - outer (diffusive) combustion cone, 7 - stand with a moveable pointer, 8 - ruler

W oparciu o przeprowadzone badania obliczono prędkość efektywną ze wzoru:

$$w_e = \frac{\dot{V}_{grz} + \dot{V}_{prz}}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (1)$$

gdzie:

$w_e$  - prędkość efektywna, m/s,

$\dot{V}_{grz}$  - rzeczywisty objętościowy strumień gazu,  $m^3/s$ ,

$\dot{V}_{\text{prz}}$  - rzeczywisty objętościowy strumień powietrza,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,

$D$  - średnica palnika, m.

W następnym kroku policzono stosunek nadmiaru powietrza  $\lambda$  ze wzoru:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{\text{prz}}}{\dot{V}_{\text{grz}} \cdot n_{\text{amin}}} \quad (2)$$

gdzie:

$\lambda$  - stosunek nadmiaru powietrza,

$n_{\text{amin}}$  - minimalne zapotrzebowanie powietrza,  $\text{kmol pow./kmol gazu suchego}$ .

Minimalne zapotrzebowanie powietrza  $n_{\text{amin}}$  wyznaczono jako:

$$n_{\text{amin}} = \frac{n_{\text{O}_2 \text{ min}}}{z_{\text{O}_2}} \quad (3)$$

gdzie:

$n_{\text{O}_2 \text{ min}}$  - minimalne zapotrzebowanie na tlen,  $\text{kmol O}_2/\text{kmol gazu suchego}$ ,

$z_{\text{O}_2}$  - udział molowy/objętościowy tlenu w powietrzu (przyjęto  $z_{\text{O}_2} = 0,21$ ).

Minimalne zapotrzebowanie powietrza wyliczono ze wzoru:

$$n_{\text{O}_2 \text{ min}} = n'_C + n'_S + \frac{1}{2} n'_{\text{H}_2} - n'_{\text{O}_2} \quad (4)$$

gdzie:  $n'_C, n'_S, n'_{\text{H}_2}, n'_{\text{O}_2}$  - jednostkowa zawartość podstawowych składników paliwa gazowego, odpowiednio: węgla, siarki, wodoru i tlenu,  $\text{kmol składnika/kmol gazu suchego}$ .

Następnie wyznaczono kąt  $\varphi$ . Jest to kąt pomiędzy wektorem prędkości normalnej a wektorem prędkości efektywnej. Korzystając z podobieństwa trójkątów, można stwierdzić, że ma on taką samą wartość co kąt pomiędzy promieniem  $R$  palnika a poboczną stożka. Można go wyznaczyć ze wzoru:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{H}{R}\right) \quad (5)$$

gdzie:

$\alpha$  - kąt pomiędzy wektorem prędkości normalnej a wektorem prędkości efektywnej,  $^\circ$ ,

$H$  - wysokość stożka spalania (kinetycznego) zmierzona podczas eksperymentu, m,

$R$  - promień palnika, zmierzony podczas eksperymentu, m.

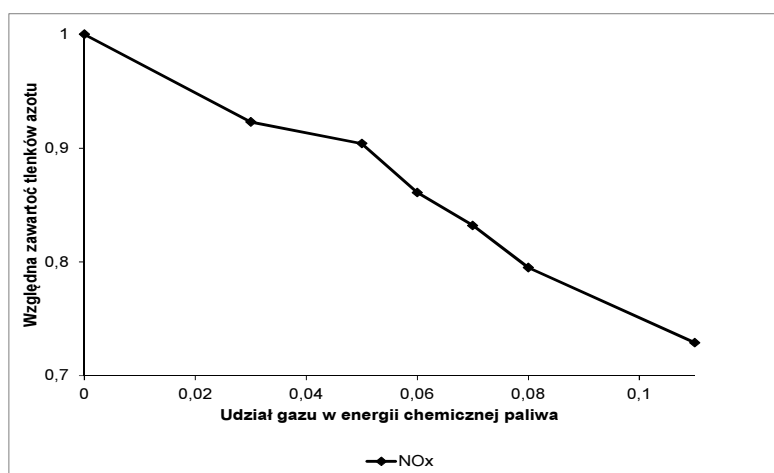
Następnie policzono normalną prędkość spalania, korzystając z poniższej zależności:

$$w_n = w_e \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

## 2. Wyniki badań i dyskusja

### 2.1. Emisja NO<sub>x</sub> i CO

Na wykresie przedstawionym na rysunku 4 pokazana została zależność pomiędzy względną zawartością tlenków azotu a udziałem gazu w energii chemicznej paliwa (określonej za pomocą wartości opałowej).

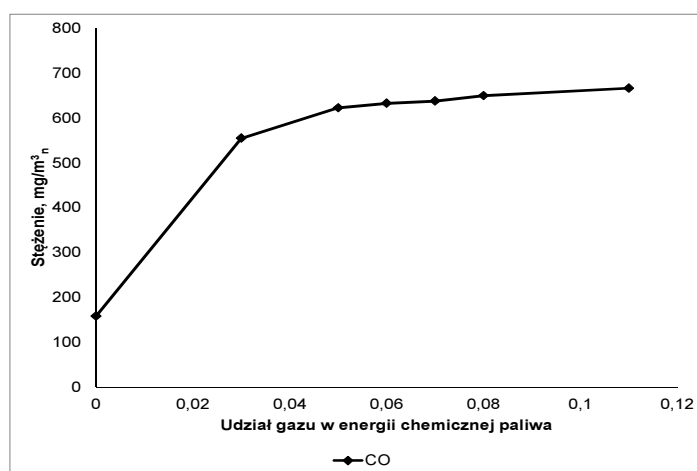


Rys. 4. Względna zawartość tlenków azotu w funkcji udziału gazu w energii chemicznej paliwa

Fig. 4. Relative amount of nitric oxides as a function of gas fraction in fuel chemical energy

Analiza przedstawionych wyników wskazuje, że ilość tlenków azotu emitowanych podczas spalania zmalała. Dane pokazują, że wraz ze wzrostem udziału gazu w całości energii chemicznej paliwa zwiększa się efektywność redukcji emisji. Najwięcej, bo ok. 30% redukcji, osiągnięto, gdy strumień gazu sięgał 11% energii paliwa. Elementem wpływającym na powodzenie reburningu w badanym kotle jest jego konstrukcja. Stosunkowo niewielka odległość pomiędzy palnikiem a deflektorem uwarunkowała miejsce wtrysku gazu. Dodatkowo w kotle o tak małej mocy temperatura za deflektorem może być już zbyt niska dla procesu reburningu. Zgodnie z [6] postuluje się, że temperatura optymalna reburningu z zastosowaniem gazu ze zgazowania osadów ściekowych wynosi około 1200 K. Ze względu na obniżenie temperatury reburning zachodził przez stosunkowo krótki czas, co mogło negatywnie wpłynąć na jego efektywność. Znajduje to potwierdzenie w pracy [7], gdzie wykazano, że generalnie efektywność reburningu zmniejsza się wraz z temperaturą. Pomimo warunków w badanym kotle wykazano, że gaz ze zgazowania osadów ściekowych ma możliwość wytworzenia atmosfery redukcyjnej, co stanowi o jego przydatności jako paliwa reburningowego. Przewiduje się wzrost efektywności reburningu przy użyciu gazu uzyskanego za pomocą innych czynników zgazowujących. Według analiz przeprowadzonych w [8], najlepszym czynnikiem zgazowującym jest para wodna. Wykres przedstawiony na rysunku 5 pokazuje zależność

pomiędzy zawartością tlenku węgla (w  $\text{mg}/\text{m}_n^3$ ) w spalinach a udziałem gazu w energii chemicznej paliwa.



Rys. 5. Stężenie tlenku węgla w spalinach w funkcji udziału gazu w energii chemicznej paliwa

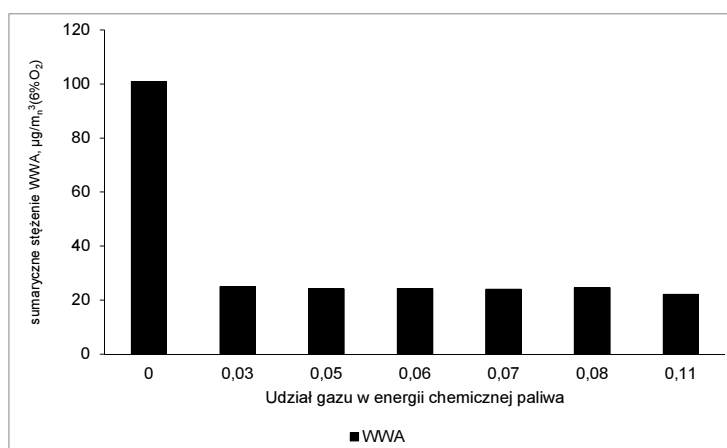
Fig. 5. CO concentration in flue gases as a function of gas fraction in fuel chemical energy

Przedstawiony wykres ukazuje wyraźne i gwałtowne zwiększenie się zawartości tlenku węgla w spalinach. Jest to bezpośredni efekt doprowadzenia paliwa dodatkowego. Po pierwsze, gaz ze zgazowania osadów ściekowych w dużej mierze składa się z CO, a po drugie, zwiększenie strumienia paliwa przy stałym strumieniu powietrza powoduje wzrost ilości produktów spalania niecałkowitego i niepełnego spalania. Otrzymane wyniki znajdują potwierdzenie w pracy [9], gdzie także zanotowano znaczący wzrost zawartości tlenku węgla. Jest to oczywiste następstwo wytworzenia strefy redukcyjnej, dlatego w procesie w skali przemysłowej zachodzi potrzeba zastosowania także strefy utleniającej.

## 2.2. Emisja WWA

Summaryczne stężenie WWA ( $\mu\text{g}/\text{m}_n^3$  dla 6%  $\text{O}_2$ ) przy współspalaniu gazu utrzymuje się w przybliżeniu na stałym poziomie - ok.  $24 \mu\text{g}/\text{m}_n^3$  niezależnie od ilości gazu (rys. 6). Jedynie dla ostatniego pomiaru zaobserwowano niewielkie obniżenie do  $22 \mu\text{g}/\text{m}_n^3$ . Trudno określić, czy ta różnica jest wywołana rzeczywistym obniżeniem ilości WWA przy większej ilości gazu, czy może raczej pewną niepewnością, jaką obarczone są pomiary, zwłaszcza przy dynamicznie zmieniających się warunkach. Być może obniżenie to jest związane z mniejszym stosunkiem nadmiaru powietrza, jaki otrzymano dla tego pomiaru - zgodnie z literaturą zbyt duży stosunek nadmiaru powietrza również powoduje zwiększenie ilości WWA [10-12]. Mniejsza ilość powietrza spowodowała, iż również strumień spalin dla tego pomiaru jest mniejszy niż dla pozostałych, w związku z czym być może dłużej przebywały one w strefie reakcji, co mogło sprzyjać zmniejszeniu ilości WWA.



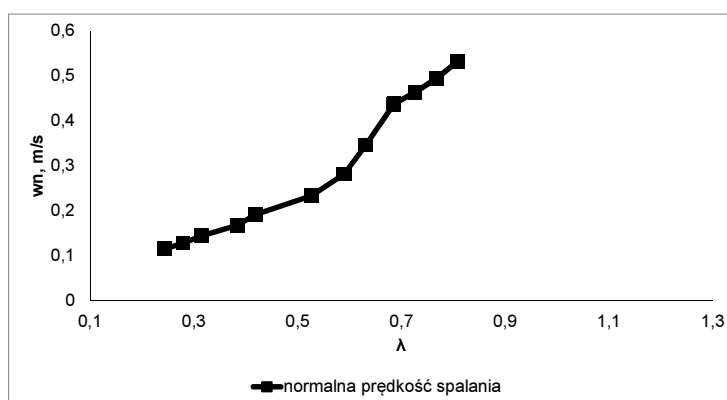


Rys. 6. Sumaryczne stężenie WWA w spalinach w funkcji udziału gazu w energii chemicznej paliwa

Fig. 6. PAH total concentration in flue gases as a function of gas fraction in fuel chemical energy

### 2.3. Normalna prędkość spalania

Na rysunku 7 przedstawiono zależność normalnej prędkości spalania w funkcji stosunku nadmiaru powietrza. Analizując poniższy wykres, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem stosunku nadmiaru powietrza normalna prędkość spalania rośnie. Przebieg zależności przyjmuje postać krzywej dzwonowej, co jest zgodne z danymi literaturowymi [13]. Wykres otrzymany z pomiarów to tylko fragment takiej krzywej dzwonowej. Wyznaczenie normalnej prędkości spalania dla większego zakresu zmian stosunku nadmiaru powietrza okazało się niemożliwe z powodu utraty stabilności płomienia. Jest to istotna cecha gazu ze zgazowania osadów ściekowych w kontekście oceny jego przydatności w rzeczywistych instalacjach przemysłowych.



Rys. 7. Normalna prędkość spalania w funkcji stosunku nadmiaru powietrza

Fig. 7. Laminar flame speed as a function of air excess ratio

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy otrzymanych wyników można sformułować następujące główne wnioski:

1. Zastosowanie procesu reburningu w kotle węglowym małej mocy powoduje znaczne obniżenie stężenia tlenków azotu w komorze spalania.
2. Dodatek gazu podwyższa stężenie CO, co w rzeczywistych instalacjach wielkoskalowych musi być regulowane poprzez zapewnienie strefy dopalającej z doprowadzeniem powietrza dodatkowego do strefy spalania.
3. Wraz ze wzrostem udziału gazu w całości energii chemicznej paliwa podstawowego stężenie WWA obniża się; niemniej jednak jego udział nie ma większego wpływu na uzyskaną wartość stężenia WWA.
4. Normalna prędkość spalania jest ważnym parametrem projektowym procesu spalania. Odgrywa istotną rolę przy rozważaniu zagadnień związanych z stabilnością płomienia. Z uwagi na to, że gazy ze zgazowania biomasy nie są typowymi gazami, istnieje potrzeba wyznaczenia ich normalnej prędkości spalania.
5. Z uwagi na utratę stabilności płomienia w zakresie wartości stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda > 1$  niemożliwe było określenie normalnej prędkości spalania analizowanego gazu. Jest to istotna cecha gazu ze zgazowania osadów ściekowych w kontekście oceny jego przydatności w rzeczywistych instalacjach przemysłowych.

## Podziękowania

*Praca naukowa częściowo wykonana w ramach projektu własnego UMO-2011/03/D/ST8/04035 „Eksperymentalna i numeryczna analiza własności palnych gazu ze zgazowania osadów ściekowych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.*

## Literatura

- [1] Werle S., Sewage sludge gasification: theoretical and experimental investigation, Environ. Protect. Eng. 2013, 39, 25-32.
- [2] Werle S., Wilk R.K., Zgłoszenie patentowe nr P-397225 z dnia 2 grudnia 2011.
- [3] Werle S., Dudziak M., Influence of wastewater treatment and the method of sludge disposal on the gasification process, Ecol. Chem. Eng. S 2014, 2, 255-268.
- [4] Werle S., Wilk R.K., Nitrogen oxides emission reduction through system integration: gasifier reactor - coal fired boiler, Proc. ECOpole 2013, 7, 751-756.
- [5] Michczyńska A., Werle S., Wyznaczenie normalnej prędkości spalania gazu ze zgazowania osadów ściekowych, [w:] Inżynieria środowiska w energetyce i motoryzacji, red. S. Werle, Gliwice 2014, 50-63.
- [6] Werle S., Modeling of the reburning process using sewage sludge-derived syngas, Waste Manage. 2012, 32, 753-758.
- [7] Alzueta M.U., Bilbao R., Millera A., Prada L., Evaluation of the use of different hydrocarbon fuels for gas reburning, Fuel 1997, 76, 1401-1407.

- [8] Kubicka S., Werle S., Badania nad zmniejszeniem emisji NO<sub>x</sub> z wykorzystaniem termicznej utylizacji osadów ściekowych, [w:] Inżynieria środowiska w energetyce i motoryzacji, red. S. Werle, Gliwice 2012, 83-94.
- [9] Hrycko P., Lasek J., Matuszek K., Biomass gasification and Polish coal-fired boilers for process of reburning in small boilers, *J. Centr. South Univ.*, 2013, 20, 1623-1630.
- [10] Wilk R.K., Podstawy niskoemisyjnego spalania, Wydawnictwo Gnome, Katowice 2001.
- [11] Wilk R., Zieliński Z., Szłęk A., Emisja wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych przy spalaniu oleju opałowego, *Gospod. Paliw. Ener.* 1995, 2, 2-6.
- [12] Liu K., Han W., Pan W.-P., Riley J.T., Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emission from coal-fired pilot FBC system, *J. Hazard. Mater.* 2001, 84, 175-188
- [13] Liu C., Yan B., Chen G., Bai X.-S., Structures and burning velocity of biomass derived gas flames, *Int. J. Hydrogen Energ.* 2010, 35, 542-55.

### Assessment of the Low Calorie Gases Usage in the Low Emission Combustion Technologies

The paper presents the results of experimental reburning process using gas from the gasification of waste biomass in small capacity coal-fired boiler. The effect of additional fuel on emissions of nitrogen oxides and other pollutants: PAHs and CO was analysed. Additionally, the results of experimental determination of the laminar flame speed of the waste biomass gasification gas as a parameter determining the possibility of a stable co-combustion with coal are presented. The results show that the amount of nitrogen oxides emitted by the addition of gaseous fuel into the combustion chamber decreased by over 30%. At the same time, the results of the measurement of PAHs in the flue gases show that the total amount of PAHs is much higher when burning the coal than through the co-combustion of gas from gasification process of sewage sludge. The impact of the co-combustion of gas in coal fired boiler on the emission of CO was also determined. It can be concluded that increasing the amount of additional fuel fed into the combustion chamber increases the concentration of carbon monoxide. It is a phenomenon that is observed in the majority of low emission combustion installations. In terms of the results of experimental studies of laminar flame speed, it was found that the values obtained for the analyzed gas from gasification of sewage sludge are consistent with theoretical calculations presented in previous works in this field. These results clearly show that there is an optimal range of parameters co-combustion of biomass gasification gas from unconventional at which it is possible to carry out the process of reburning.

**Keywords:** sewage sludge, gasification gas, reburning, CO, NO<sub>x</sub>, PAH emission, laminar flame speed