

# EMISJA ZANIECZYSZCZEŃ Z PROCESU SPALANIA BIOMASY

Grzegorz WIELGOSIŃSKI, Patrycja LECHTAŃSKA  
Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska,  
ul. Wólczańska 175, 90-924 Łódź, [wielgos@wipos.p.lodz.pl](mailto:wielgos@wipos.p.lodz.pl)

## STRESZCZENIE

Biomasa uważana jest powszechnie za paliwo, które może częściowo zastąpić klasyczne paliwa, a w szczególności węgiel. Jest paliwem odnawialnym i w rozliczeniach emisji CO<sub>2</sub> traktowana jest jako paliwo nie wnoszące emisji gazów cieplarnianych. Skład chemiczny biomasy jest jednak inny niż paliw kopalnych, w tym węgla. Inaczej również przebiega proces jej spalania. W pracy wykonano badania spalania czterech rodzajów biomasy (słoma owsiana, trociny olchowe, drewno kominkowe – topola oraz makuch rzepakowy) w laboratoryjnym piecu oporowym w zakresie temperatur 700-1100 °C i przy trzech różnych natężeniach przepływu powietrza. Wyznaczono wskaźniki emisji CO, NO oraz sumy związków organicznych jako TOC w odniesieniu do masy paliwa i uzyskane wyniki porównano z analogicznymi wskaźnikami wyznaczonymi dla spalania miazgi węglowej. Stwierdzono, że w wielu przypadkach wyznaczone wskaźniki emisji dla spalania biomasy są wyższe niż dla węgla kamiennego.

### 1. Wstęp

Wraz z rozwojem cywilizacji i wzrostem populacji świata zwiększa się zapotrzebowanie na energię. Dostęp do jej źródeł warunkuje rozwój gospodarczy, a także jest wyznacznikiem poziomu życia mieszkańców. Jednakże rozkład pierwotnych nośników energii nie jest równomierny. Aż jedna trzecia światowej populacji nie korzysta w ogóle z energii elektrycznej. Nie można więc zapewniać zrównoważonego rozwoju i zaspokajania potrzeb krajów świata bez narażenia przyszłych pokoleń na szkodę, nie znajdując innego rozwiązania problemu. Jednoczesne wyczerpywanie się zasobów paliw skłania do szukania nowych źródeł energii.

W ostatnich latach zauważa się bardzo duże zainteresowanie energią odnawialną. Energia odnawialna jest to energia uzyskiwana z naturalnych, powtarzających się procesów przyrodniczych. Występujące formy energii odnawialnej wywodzą się bezpośrednio lub pośrednio z promieniowania słonecznego lub ciepła generowanego głęboko w Ziemi.

Odnawialne źródła energii (OZE) stanowią mogą rozwiązanie alternatywne dla nieodnawialnych nośników energii (węgla kamiennego czy ropy naftowej) wykorzystywanych tradycyjnie i na szeroką skalę, tam gdzie jest to tylko możliwe. Także zwiększające się zanieczyszczenie środowiska naturalnego skłania do poszukiwań paliw bardziej mu „przyjaznych”. Dlatego też na całym świecie przeprowadza się badania, których celem są poszukiwania paliw zarówno wydajnych energetycznie jak i nie powodujących negatywnych skutków środowiskowych.

Źródłami takiej energii odnawialnej mogą być następujące nośniki [1]:

- Biomasa,
- energia wody,
- energia wnętrza Ziemi (geotermalna),
- energia Słońca,
- energia wiatru,

- energia pływów i fal morskich (maredynamiczna).

Wśród wszystkich wymienianych powyżej źródeł największym powodzeniem cieszy się obecnie biomasa.

Nazwa „biomasa” budzi pierwsze skojarzenia z substancjami organicznymi, naturalnego pochodzenia roślinnego czy zwierzęcego. Dyrektywa 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 września 2001 roku wprowadza jednoznaczna definicję tego terminu. W jego rozumieniu biomasa oznacza „*podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpady i pozostałości z przemysłu rolnego (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i miejskich*”. Podobną definicję wprowadziło także Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 grudnia 2005 roku w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej oraz zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii. Wg niego biomasa to „*stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji*”.

Biomasa jest najstarszym znanym człowiekowi źródłem pozyskiwania energii, zwłaszcza cieplnej. Jak można się domyślić, potencjał energetyczny zawarty w biomase jest ogromny, ze względu na jej głównie roślinne pochodzenie [2].

Biomasa roślinna powstaje w reakcji fotosyntezy, będącej źródłem wzrostu roślin. Podczas fotosyntezy dochodzi do pochłaniania przez rośliny energii słonecznej, która w połączeniu z wodą i absorbowanym z atmosfery dwutlenkiem węgla dostarcza roślinie niezbędnej do życia energii. Energia ta magazynowana jest w postaci wysokoenergetycznych związków organicznych, które stanowią naturalny „akumulator” energii pozyskanej ze słońca. Właśnie ta zakumulowana energia – „energia biomasy” jest źródłem zainteresowania, gdyż możliwe jest jej odzyskanie i dalsze wykorzystanie.

Wśród zalet biomasy jako odnawialnego źródła energii wymienia się przede wszystkim uniezależnienie się kraju w sferze dostaw tego nośnika energii. Polska jest krajem o klimacie sprzyjającym uprawom energetycznym a także stosunkowo zasobnym w drewno. Wiele mówi się także o ograniczaniu emisji CO<sub>2</sub> podczas spalania biomasy. Faktem jest, iż wydzielany podczas spalania roślin dwutlenek węgla powraca do środowiska naturalnego, z którego został zaabsorbowany w czasie wzrostu rośliny. Nie można jednak mówić o zmniejszeniu wpływu emisji CO<sub>2</sub> powodującego ocieplenie klimatu w momencie, gdy antropogeniczny wpływ na globalne ocieplenie nie jest potwierdzony.

## 2. Aparatura i badania

Celem prowadzonych badań było wyznaczenie wskaźników zanieczyszczeń takich jak tlenek węgla CO oraz tlenek azotu NO dla każdego z analizowanych materiałów biomasy:

- słoma rzepakowa,
- trociny olchowe,
- drewno kominkowe topolowe,
- makuch rzepakowy,

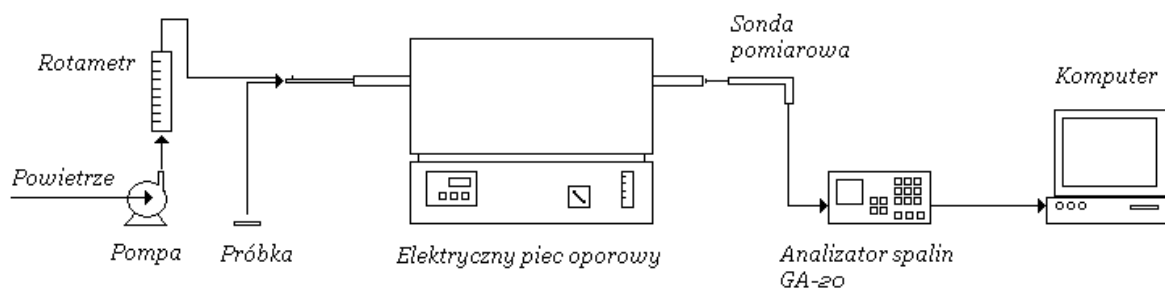
a następnie porównanie otrzymanych wyników wielkości emisji wybranych zanieczyszczeń z identycznie uzyskanymi wynikami dla materiału porównawczego jakim był węgiel kamienny. Wyznaczano także wielkość emisji węglowodorów zawartych w badanym materiale, liczonych jako całkowity węgiel organiczny TOC, a także określono jego wilgotność i

zawartości popiołu. Przeprowadzenie takiej analizy porównawczej miało na celu określenie istnienia wpływu parametrów prowadzenia procesu spalania biomasy na emisję zanieczyszczeń w trakcie jej spalania oraz sporządzenia charakterystyki tych wpływów. Oznaczone właściwości badanych materiałów takie jak wilgotność, zawartość substancji organicznych oraz popiołu zostały przedstawione w tabeli 1.

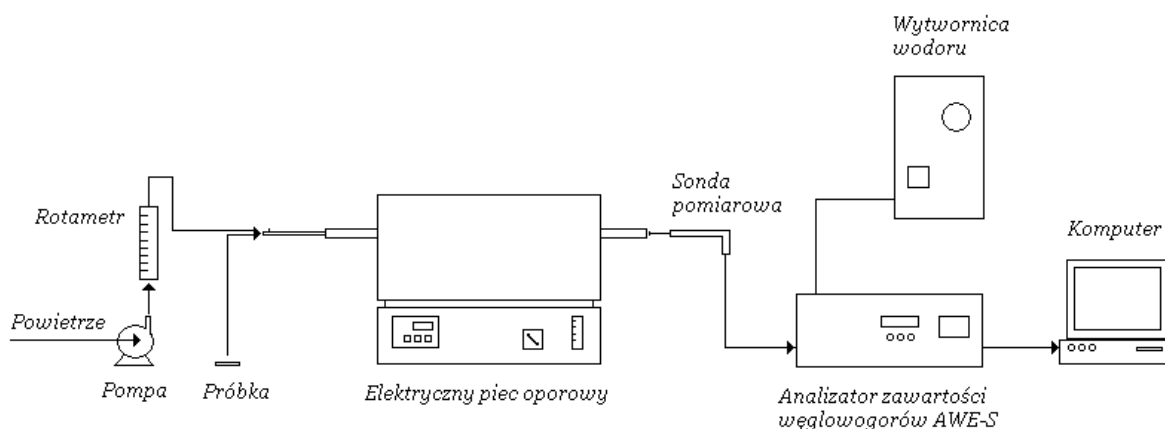
Tabela 1. Zestawienie wielkości charakteryzujących badane próbki

Badany materiał	Wilgotność	Zawartość związków organicznych	Pozostałość po spaleniu
	%	%	%
SŁOMA	6,87	94,23	5,37
TROCINY	8,07	99,62	0,36
DREWNO	8,48	99,54	0,43
MAKUCH	7,82	92,07	7,32
WĘGIEL	5,28	90,13	9,35

Podczas wyznaczania wielkości emisji tlenku węgla oraz tlenku azotu korzystano z aparatury przedstawionej na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego do pomiaru emisji CO i NO



Rys. 2. Schemat stanowiska doświadczalnego do pomiaru emisji TOC

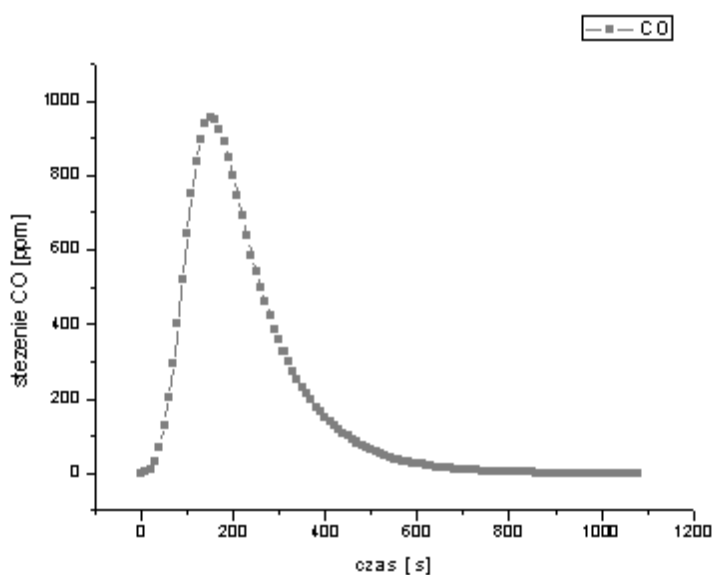
Proces spalania próbek biomasy oraz miazgi węgla kamiennego przeprowadzany był w elektrycznym wysokotemperaturowym piecu oporowym z poziomą komorą roboczą typu PR-45/1350-M. Utrzymywanie zadanej temperatury w czasie pomiaru umożliwiał wbudowany regulator PRT 911. Pomiar tlenku węgla oraz tlenku azotu w gazach spalinowych wykonany został za pomocą przepływowego analizatora spalin typu GA-20. Do pomiaru sumy

węglowodorów użyto analizatora FID typu AWE-S, współpracującego z wytwornicą wodoru typu WHR-1.

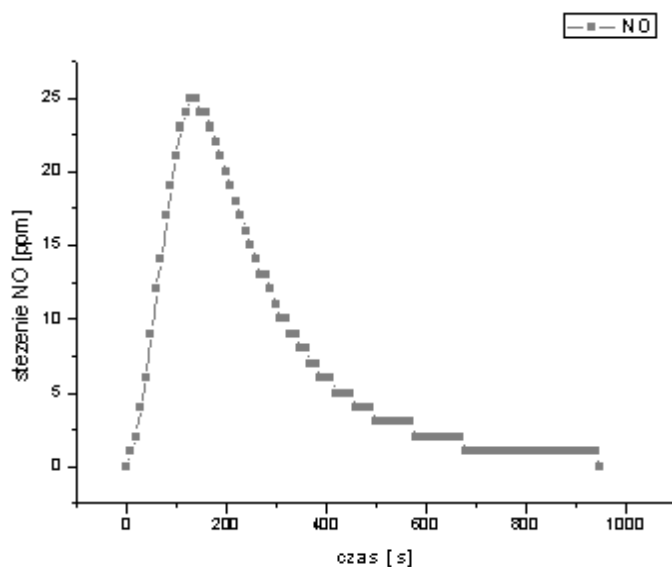
Spalanie materiałów biomasy i węgla prowadzone było dla parametrów zmiennych następująco:

- temperatura w komorze spalania: 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1 000 °C, 1 100 °C
- natężenie przepływu powietrza: 4 dm<sup>3</sup>/min (0,000667 m<sup>3</sup>/s); 9,1 dm<sup>3</sup>/min (0,00152 m<sup>3</sup>/s); 14,7 dm<sup>3</sup>/min (0,00245 m<sup>3</sup>/s).

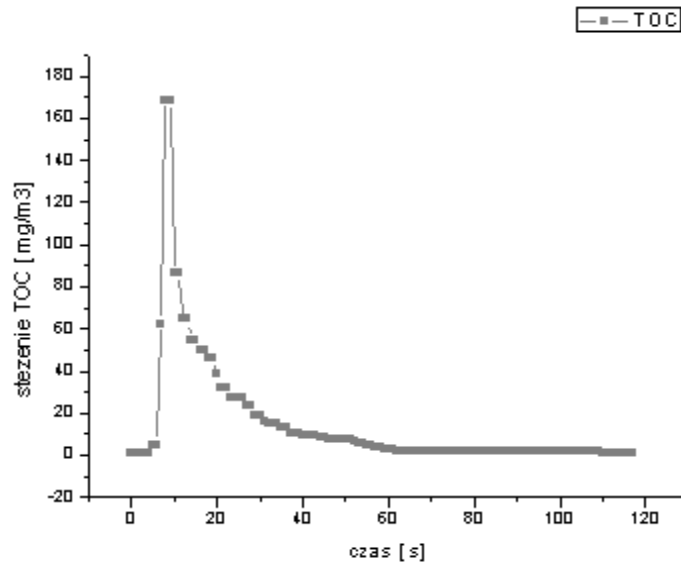
Dla każdego materiału, w każdej kombinacji warunków spalania, wykonane zostały trzy próby, co było spowodowane dużą niejednorodnością badanych substancji. Wartości emisji zostały wyliczone jako średnia, a kształt krzywych obrazujący przebiegi emisji CO, NO i TOC został przedstawiony na rysunkach 3, 4 i 5.



Rys. 3. Przykładowa zależność emisji CO od czasu



Rys. 4. Przykładowa zależność emisji NO od czasu



Rys. 5. Przykładowa zależność emisji TOC od czasu

Wartości wskaźnika emisji zanieczyszczenia  $w_z$  (w mg badanego zanieczyszczenia na 1 gram spalanego paliwa) obliczone zostały na podstawie zależności (1):

$$w_z = \frac{Q \cdot c_{sr} \cdot \tau}{m_p} \quad (1)$$

gdzie:  $Q$  – natężenie przepływu powietrza [ $m^3/s$ ]

$m_p$  – masa badanej próbki [mg]

$\tau$  – czas spalania próbki [s]

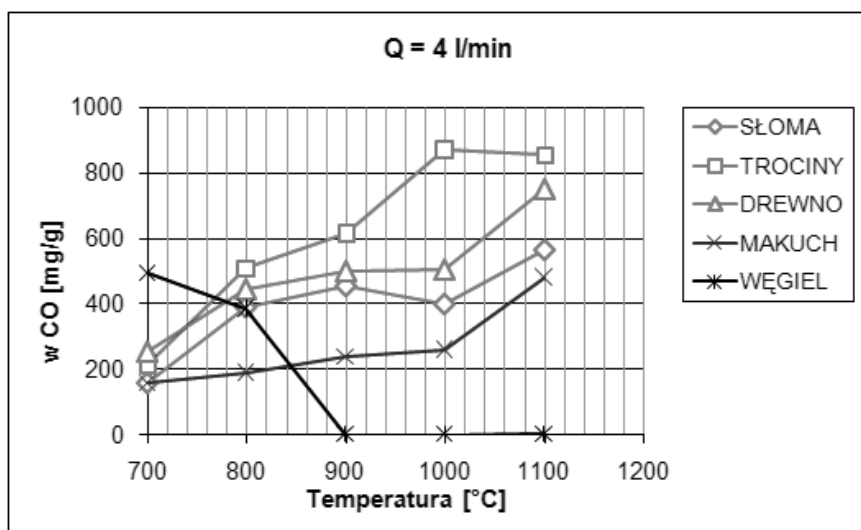
$c_{sr}$  – średnie stężenie zanieczyszczeń [ $mg/m^3$ ], obliczane z zależności (2):

$$c_{sr} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} c(\tau) dt \quad (2)$$

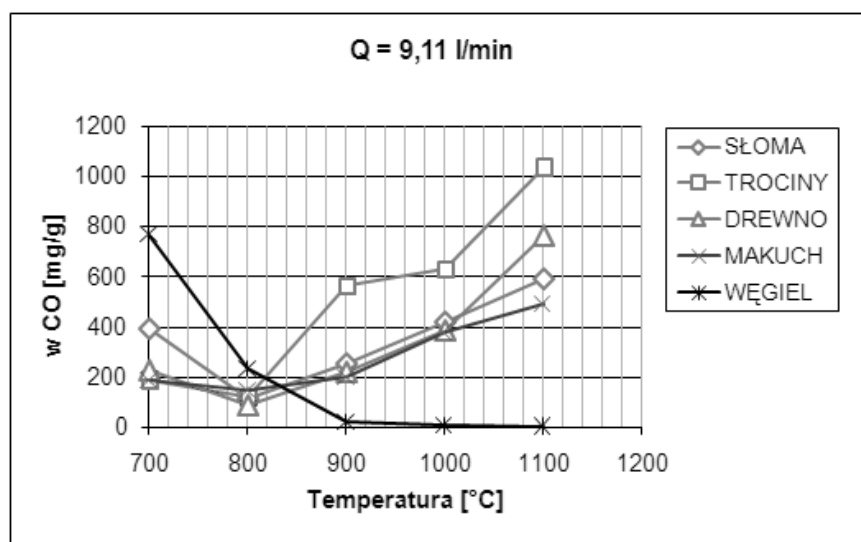
Wszystkie badane próbki, w wszystkich warunkach prowadzenia procesu spalania, były spalane przy znacznym nadmiarze powietrza. Metodyka wyznaczania wskaźników emisji podczas spalania została szczegółowo opisana we wcześniejszych publikacjach [3, 4].

### 3. Uzyskane wyniki

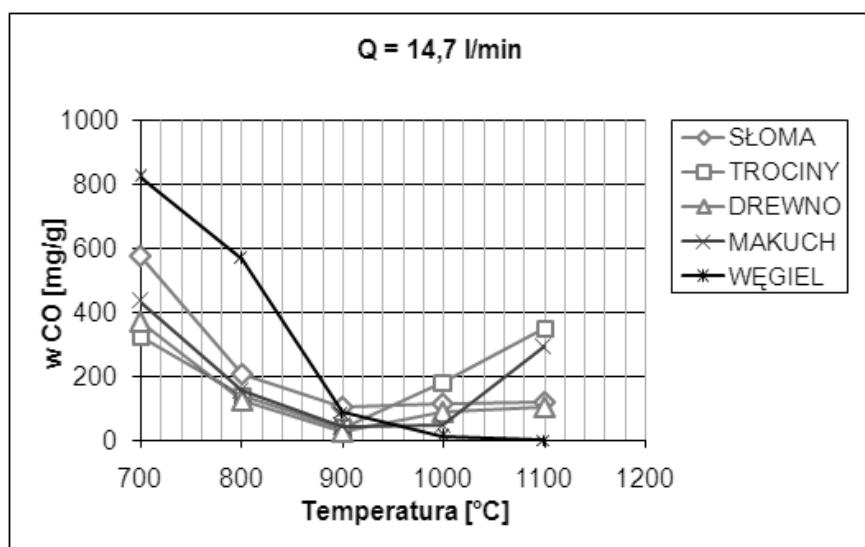
Dla każdej badanej próbki czterech rodzajów biomasy oraz próbek mialu węgla kamiennego wykonano trzy powtórzenia przeprowadzanych pomiarów, w warunkach każdej z pięciu założonych temperatur oraz wszystkich trzech natężeniach przepływu powietrza. W ten sposób dla każdej z próbek otrzymano wskaźnik emisji powstałego zanieczyszczenia (CO, NO i TOC) rozumiany jako ilość wybranego zanieczyszczenia w mg odniesiona do jednostkowej masy (1g) spalanego paliwa. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wykresy obrazujące zmianę wskaźników zanieczyszczeń CO, NO i TOC dla wszystkich badanych materiałów wraz z temperaturą w warunkach poszczególnych natężeń przepływu powietrza, co zostało zobrazowane na rysunkach 6-14.



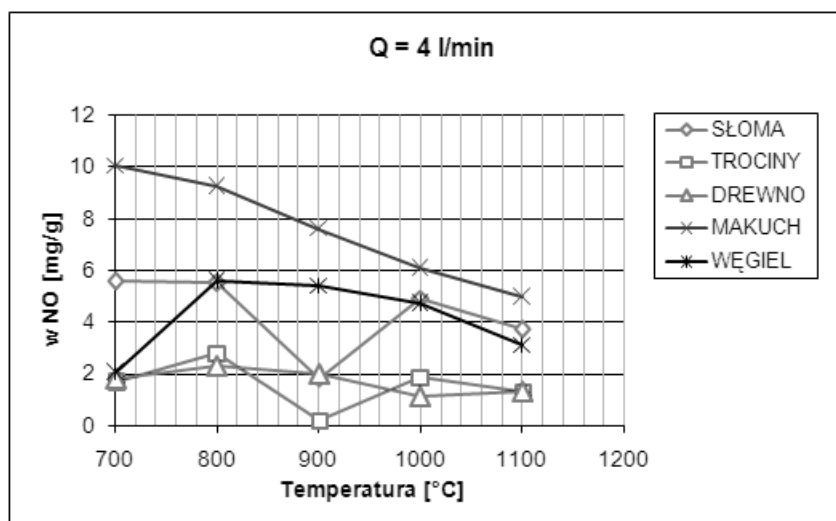
Rys. 6. Zależność wskaźnika emisji CO od temperatury dla  $Q = 4,0 \text{ dm}^3/\text{min}$



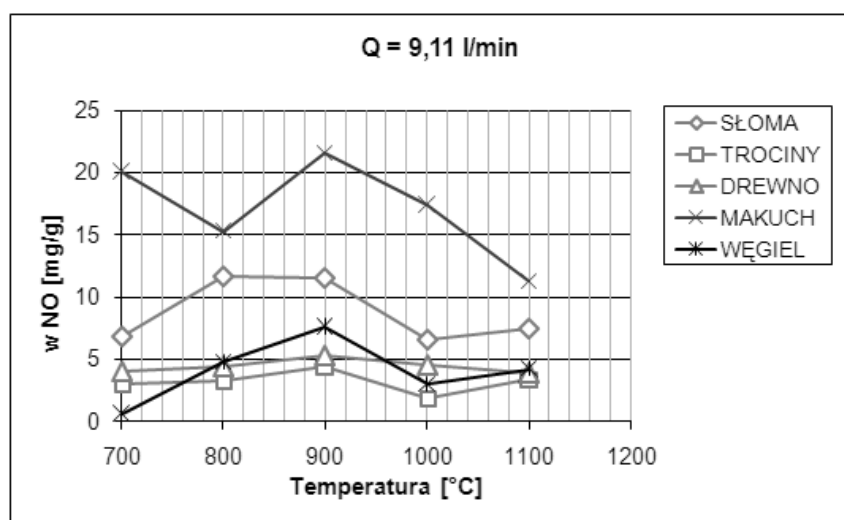
Rys. 7. Zależność wskaźnika emisji CO od temperatury dla  $Q = 9,11 \text{ dm}^3/\text{min}$



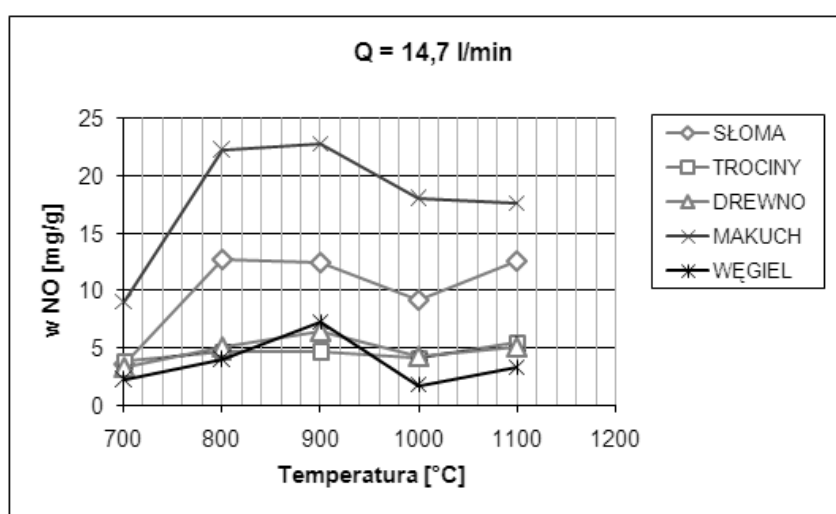
Rys. 8. Zależność wskaźnika emisji CO od temperatury dla  $Q = 14,7 \text{ dm}^3/\text{min}$



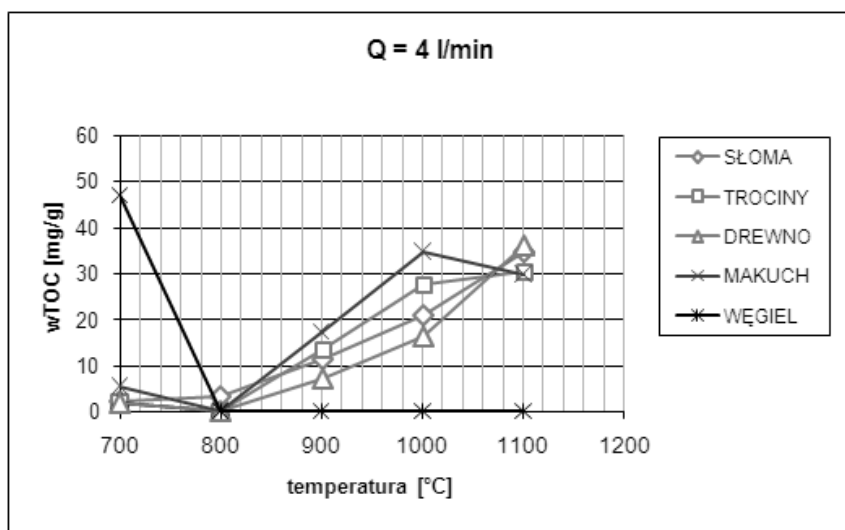
Rys. 9. Zależność wskaźnika emisji NO od temperatury dla  $Q = 4,0 \text{ dm}^3/\text{min}$



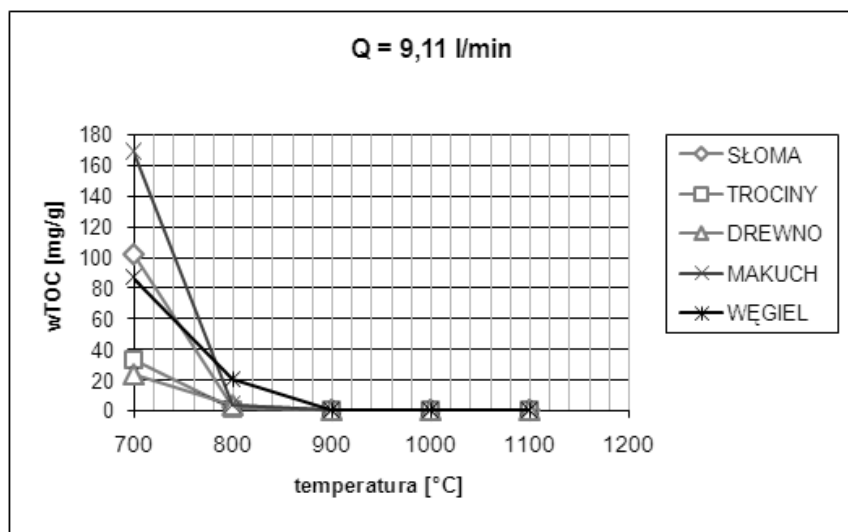
Rys. 10. Zależność wskaźnika emisji NO od temperatury dla  $Q = 9,11 \text{ dm}^3/\text{min}$



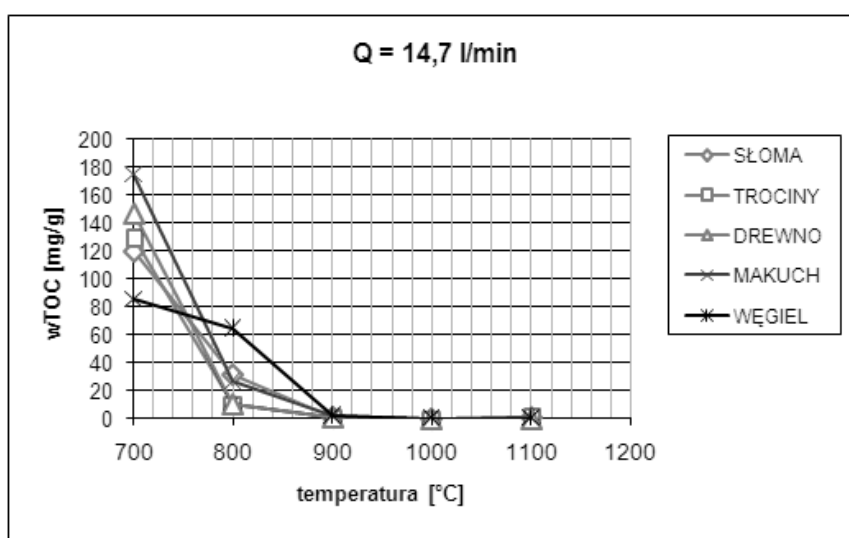
Rys. 11. Zależność wskaźnika emisji NO od temperatury dla  $Q = 14,7 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 12. Zależność wskaźnika emisji TOC od temperatury dla  $Q = 4,0 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 13. Zależność wskaźnika emisji TOC od temperatury dla  $Q = 9,11 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 14. Zależność wskaźnika emisji TOC od temperatury dla  $Q = 14,7 \text{ dm}^3/\text{min}$



#### 4. Podsumowanie

W porównaniu z badanymi próbkami biomasy, węgiel kamienny nie jest materiałem wypadającym gorzej pod względem emisji zanieczyszczeń. W szeregu przypadków wydaje się być on nawet materiałem dużo lepszym. Wystarczy zastosować temperaturę spalania powyżej 900 °C, aby nie miał on „konkurenta” pod względem wydzielanego CO. Żaden bowiem z badanych materiałów biomasy stałej nie osiągnął podobnych mu wyników w tym zakresie. Także w sferze emisji tlenku azotu, węgiel kamienny nie powoduje największej jego emisji. Wskaźniki emisji umieszczają go raczej w gronie materiałów powodujących małą emisję tego związku (zajmuje miejsce obok drewna i trocin). Niewątpliwie największą emisją NO charakteryzuje się makuch rzepakowy. W temperaturze powyżej 800 °C węgiel, tak jak i biomasa, emituje mniejsze ilości ogólnego węgla organicznego. Jedynie w temperaturze 700 °C emisja TOC ze spalania węgla kamiennego jest wyższa.

Jest to zjawisko bardzo niekorzystne, gdyż świadczy o przebiegu wysokotemperaturowej wtórnej syntezy związków organicznych z rodników organicznych obecnych w strefie spalania. Synteza ta polega między innymi na cyklizacji tj. budowie i zamykaniu pierścieni aromatycznych, a w dalszym etapie chlorowaniu i syntezy dioksyn. Chlor gazowy jest obecny praktycznie zawsze w strefie spalania, gdyż wszystkie paliwa, w tym również biomasa zawierają niewielkie ilości chloru. W przypadku spalania węgla wysokotemperaturowa synteza dioksyn przebiega w niewielkim stopniu ze względu na inhibicyjny wpływ siarki obecnej w węglu. W przypadku biopaliw zawartość siarki jest znacznie niższa i tym samym można oczekiwać emisji dioksyn i furanów. Potwierdzają to wyniki badań spalania drewna prowadzone w ostatnich latach przez licznych badaczy [5-7]. (*Nussbaumer 1999, Lavric 2004, 2005*)

Jak widać, spalanie biomasy stałej w większości przypadków nie powoduje zmniejszenia wydzielanych zanieczyszczeń. Porównanie wpływu warunków procesu spalania na emisję zanieczyszczeń nie daje jednoznacznych wyników i wytycznych, umożliwiających wybór jednego „dobrego” paliwa. Każde z badanych wyróżnia się bowiem osobliwymi cechami w wybranych dla siebie warunkach. Wykonane badania dają jednak możliwość stworzenia sobie obrazu charakteryzującego dany materiał. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że w wielu przypadkach wyznaczone wskaźniki emisji dla spalania biomasy są wyższe niż dla węgla kamiennego. W szczególności dotyczy to emisji sumy związków organicznych. Emisja ta w przypadku energetycznego spalania paliw nie jest normowana w Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, a może stanowić zagrożenie dla środowiska, gdyż może być ona również źródłem niekontrolowanej emisji dioksyn do środowiska. Reasumując należy stwierdzić, że z punktu widzenia emisji zanieczyszczeń do powietrza trudno uznać biomasę za paliwo wybitnie ekologiczne i niskoemisyjne..

Szukanie nowych paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych, związane może być zatem niekoniecznie z chęcią poprawy jakości środowiska, lecz bardziej ze znalezieniem ekonomicznego, odnawialnego, efektywnego energetycznie i w miarę możliwości ekologicznego paliwa zastępczego dla kończących się zasobów paliw kopalnych.

#### Literatura

1. Lewandowski W.: „roekologiczne odnawialne źródła energii, WNT, Warszawa 2006
2. Ciechanowicz W.: Odnawialne źródła energii, Aura, 2005, Nr 8

3. Wielgoński G., Nowicki M.: Badania nad termicznym rozkładem osadów ściekowych; Ciepne maszyny Przepływowe - Turbomachinery, Politechnika Łódzka, 2004, Nr 126, 181-189
4. Wielgoński G. – Czy Biomasa jest paliwem ekologicznym? - rozdział w monografii Polska Inżynieria Środowiska pięć lat po wstąpieniu do Unii Europejskiej. Tom. I. (red. J. Ozonek i M. Pawłowska), Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin, 2009, vol. 58, 347-356
5. Nussbaumer T., Hasler P.: Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen, Holz als Rauch- und Werkstoff, 1999, 57, 13-22
6. Lavric E. D., Konnov A. A., de Ruyck J.: Dioxin levels in wood combustion - a review, Biomass and Bioenergy, 2004, 26, 115-145
7. Lavric E. D., Konnov A. A., de Ruyck J.: Modeling the formation of precursors of dioxins during combustion of woody fuel volatiles, Fuel, 2005, 84, 323-334.