Drewno. Pr. Nauk. Donies. Komunik. 2012, vol. 55, nr 188

Monika Zajemska

ANALIZA TEORETYCZNO-EKSPERYMENTALNA WPŁYWU WSPÓŁSPALANIA ODPADÓW DRZEWNYCH W FORMIE PALIW REBURNINGOWYCH Z GAZEM ZIEMNYM NA SKŁAD CHEMICZNY SPALIN

W artykule podjęto problematykę wykorzystania stałych odpadów drzewnych jako paliw reburningowych, w procesie współspalania z gazem ziemnym. Zaproponowana forma spalania stwarza możliwość nie tylko zagospodarowania odpadów przemysłu drzewnego, ale również redukcji zanieczyszczeń, a w szczególności tlenków azotu, ze względu na specyfikę metody reburningu. Ze względu na ograniczone możliwości pomiarowe eksperyment laboratoryjny poszerzono o symulacje numeryczne.

Słowa kluczowe: współspalanie, reburning, odpady drzewne, emisja zanieczyszczeń, numeryczne modelowanie

Wprowadzenie

Ze względu na ograniczone zasoby paliw kopalnych oraz postępujące zanieczyszczenie środowiska, a w szczególności zmiany klimatyczne, będące wynikiem spalania, obserwuje się od pewnego czasu wzrost zainteresowania biomasą, w tym drewnem odpadowym. Wykorzystanie biomasy do produkcji energii cieplnej oraz elektrycznej w postaci produktów ubocznych z przemysłu drzewnego pozwala ograniczyć zużycie węgla oraz obniżyć emisję niektórych zanieczyszczeń do atmosfery np. CO_2, ze względu na tzw. zerowy bilans dwutlenku węgla. Dodatkowym efektem ekologicznym jest stosunkowo niska emisja dwutlenku siarki oraz tlenków azotu. Najprostszym sposobem zagospodarowania odpadów drzewnych jest ich spalanie lub współspalanie z węglem, które na szeroką skalę jest stosowane w energetyce. Głównym źródłem odpadów drzewnych są tartaki oraz zakłady przerabiające drewno i dostarczające odpady w postaci pyłu, trocin, wiór, zrzyn i klocków. Dużą grupę stanowi też drewno pochodzące ze starych mebli, opakowań, drewno ogrodowe, rozbiórkowe, jak również

Monika Zajemska, Politechnika Częstochowska, Polska
e-mail: poskart@wip.pcz.pl

drewno z zabiegów pielęgnacyjnych [Nawrot 2007; Panek – Gondek 2007; Karwasz 2007].

Energetyczne zagospodarowanie paliw odpadowych pochodzenia roślinnego jest korzystne nie tylko ze względów ekonomicznych, ale przede wszystkim ekologicznych, o czym świadczą liczne wyniki badań [Cichy i in. 2010; Poskart i in. 2008; Szecówka i in. 2008].

W niniejszym artykule omówiono jeden ze sposobów energetycznego wykorzystania biomasy w procesie pośredniego jej współspalania z paliwem konwencjonalnym, którym był gaz ziemny, a mianowicie proces reburningu. W procesie tym odpady pochodzenia roślinnego stosuje się jako paliwa redukcyjne, a ich udział w całkowitej ilości ciepła doprowadzanego do procesu nie powinien przekraczać 20% [Szecówka 2009]. Metoda reburningu oprócz korzyści ekonomicznych, polegających na oszczędności paliw kopalnych cechuje się wysokim stopniem redukcji zanieczyszczeń. Należy ona bowiem do grupy pierwotnych metod redukcji emisji szkodliwych produktów spalania, a w szczególności NO_x, które należą do jednych z najbardziej uciążliwych zanieczyszczeń gazowych formowanych podczas spalania.

Istota procesu reburningu polega na wprowadzaniu do komory spalania w strefę popłomienną dodatkowego paliwa, którym jest paliwo węglowodorowe, a powstające z jego rozpadu rodniki CH_i, reagując z tlenkami azotu, redukują je do azotu molekularnego. Istotnymi parametrami wpływającymi na skuteczność reburningu są m.in.: stosunek nadmiaru powietrza, stechiometria w strefie reburningu i czas przebywania reagentów. Proces ten charakteryzuje się dużą skutecznością przy swej prostocie i stosunkowo niskich nakładach inwestycyjnych. Obok gazu ziemnego, pyłu węglowego czy lekkich olejów opałowych jednym z paliw węglowodorowych jest również biomasa drzewna w postaci trocin, zrębków, pyłu oraz biogaz. Biomasa stanowi idealne paliwo redukcyjne w procesie reburningu ze względu na swoje właściwości fizyko-chemiczne, m.in. wysoką zawartość części lotnych [Golec 2004; Borycka 2009; Ściążko i in. 2006; Kruczek i in. 2003; Kordylewski 2000].

Ze względu na złożony mechanizm chemiczny procesu współspalania paliw konwencjonalnych z biomasą, w analizie eksperymentalnej zjawisk towarzyszących procesom spalania wykorzystuje się coraz częściej metody numeryczne [Williams 2012; Lee i in. 2007; Venturini i in. 2010; Ouimette i in. 2009]. Przykładem jest opisana w niniejszym artykule numeryczna analiza procesu formowania zanieczyszczeń podczas spalania gazu ziemnego z odpadami drzewnymi.

Cel badań

Zasadniczym celem badań była analiza wpływu współspalania gazu ziemnego z paliwami w postaci odpadów drzewnych w procesie tzw. reburningu na kon-

centrację wybranych produktów spalania, a mianowicie tlenków azotu (NO_x) w spalinach.

Zakres badań

Zakres pracy obejmował:
- przygotowanie próbek: suszenie, rozdrabnianie,
- analizę składu ziarnowego wytypowanych materiałów,
- wyznaczenie własności cieplno-fizycznych: oznaczenie zawartości wilgoci i popiołu, oznaczenie zawartości części lotnych, oznaczenie ciepła spalania i obliczenie wartości opałowej,
- wstępny eksperyment „na gorąco" w komorze grzewczej: ustalenie parametrów przepływowych, pomiar stężenia NO_x w spalinach wylotowych, pomiar temperatury na długości komory,
- zasadniczy eksperyment laboratoryjny z paliwem reburningowym: pomiar stężenia NO_x na wyjściu z komory, pomiar temperatury spalin,
- symulacje komputerowe.

Metodyka badań

Zaprezentowane w artykule badania obejmowały zarówno eksperyment laboratoryjny, jak i symulacje numeryczne z użyciem profesjonalnego oprogramowania CHEMKIN – PRO. Pierwsze, miały na celu zbadanie wpływu wybranych materiałów pochodzenia roślinnego współspalanych z gazem ziemnym na skład chemiczny spalin, a w szczególności stężenie NO_x. Ze względu na ograniczone możliwości pomiarowe, o których wspomniano w dalszej części artykułu, przeprowadzono symulacje komputerowe, który dały pełen obraz formowanych zanieczyszczeń, a także umożliwiły dokonanie obliczeń w szerszym niż eksperyment zakresie.

Zasadnicze badania eksperymentalne wymagały przeprowadzenia szeregu działań wstępnych, mających na celu przygotowanie próbek do badań „na gorąco", analizę składu ziarnowego analizowanych materiałów, czy też określenie własności cieplno-fizycznych. Końcowym etapem przygotowań do zasadniczych prób było przeprowadzenie wstępnych pomiarów na wygrzanej komorze o ustabilizowanej temperaturze. Określono parametry przepływowe, tj. strumienie powietrza i gazu ziemnego dla spalania ze stosunkiem nadmiaru powietrza =1,07. Ponadto, wyznaczono profil temperatury na długości komory oraz zmierzono stężenia wybranych produktów spalania, a następnie przeprowadzono eksperyment zasadniczy z zastosowaniem paliw reburningowych.

Surowce do badań

Analizie poddano dwa rodzaje odpadów drzewnych o różnym stopniu granulacji, a mianowicie:
- pył drzewny z zakładu stolarskiego,
- odpady z tartaku.

Przygotowanie próbek do badań

Przed przystąpieniem do badań wszystkie materiały poddano suszeniu, a następnie rozdrobnieniu w laboratoryjnym młynku nożowym do frakcji 1 mm. Rozdrobniony materiał przesiewano dodatkowo na sitach o oczkach 1 mm, a pozostałe na sicie ziarna o rozmiarach powyżej 1 mm zawracano do ponownego rozdrobnienia. Dodatkowo próbki poddano analizie składu ziarnowego za pomocą analizatora IPS U, służącego do pomiaru wielkości cząstek niesklejających się od 2 do 2000 μm.

Wyznaczanie własności cieplno-fizycznych analizowanych materiałów

Przed przystąpieniem do badań „na gorąco" wytypowane materiały poddano analizie, mającej na celu wyznaczenie własności cieplno-fizycznych. Zgodnie z polskimi normami oznaczono:
- zawartość wilgoci (PN-80/04511),
- zawartość części lotnych (PN-G-04516),
- zawartość popiołu (PN-80/G-04512),
- ciepło spalania i wartość opałową (PN-81/G-04513).

W tabeli 1 zestawiono wybrane własności cieplno-fizyczne analizowanych materiałów.

Tabela 1. Wybrane własności cieplno-fizyczne analizowanych materiałów
Table 1. Selected thermo-physical properties of analyzed material

Lp.	Paliwo *Fuel*	Wartość opałowa *Calorific value* MJ/kg	Ciepło spalania *Heat of combustion* MJ/kg	Zawartość popiołu *Ash contents* %	Zawartość części lotnych *Contents of volatile matter* %	Zawartość wilgoci *Moisture* %
	Odpady z przemysłu drzewnego *Waste from wood industry*					
1	Pył Drzewny *Wood dust*	17,172	18,502	0,36	76,015	12,2
2	Odpady z tartaku *Sawmill waste*	16,255	17,506	1,32	79,053	6,2

Z przeprowadzonej analizy wybranych własności badanych materiałów wynika, że zarówno odpady z zakładu stolarskiego, jak i z tartaku nadają się do energetycznego wykorzystania, ze względu na dość wysoką wartość opałową (tabela 1).

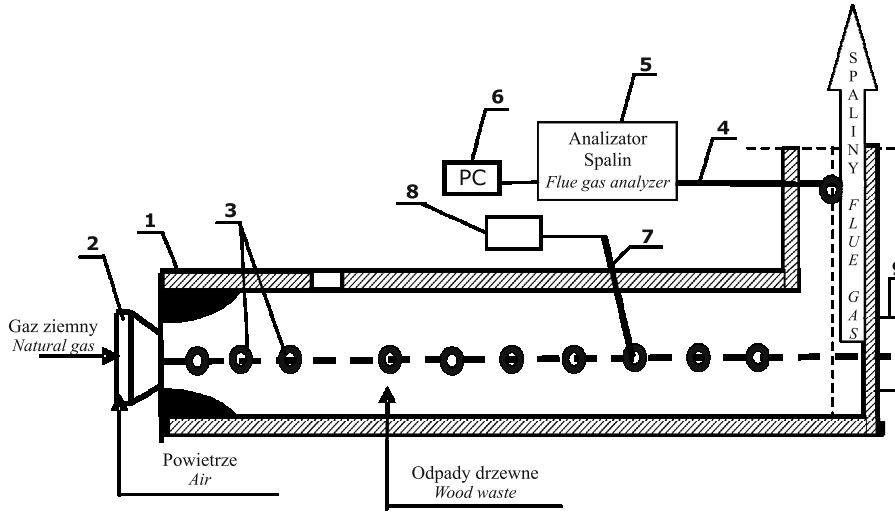
Sposób wprowadzania próbek do komory grzewczej

Wprowadzanie do komory eksperymentalnej wytypowanych do badań próbek wymagało odpowiedniego podajnika, który zapewniłby równomierne podawanie materiału. W tym celu wytypowano dwa urządzenia, a mianowicie podajnik fluidyzacyjny i podajnik ślimakowy. Pierwszy z wymienionych charakteryzował się wysoką skutecznością rozpylania, w wyniku wytworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej, co z kolei wymagało doprowadzenia odpowiedniego strumienia objętościowego powietrza fluidyzacyjnego. Stwarzało to jednak problemy związane z uzyskaniem atmosfery redukcyjnej ($\lambda < 1$), warunku koniecznego dla strefy reburningowej. Zmniejszenie strumienia powietrza powodowało nierównomierności w doprowadzaniu materiałów, polegające na występowaniu okresów wytwarzania mieszanki o mniejszej oraz większej koncentracji cząstek stałych, co uniemożliwiało prowadzenie eksperymentów. Ponadto, niektóre próbki ulegały zbrylaniu, co dodatkowo zakłócało pracę podajnika. Drugim z wytypowanych podajników, był podajnik ślimakowy o stałym wydatku objętościowym próbek. Wprowadzane na wylocie powietrze nadawało odpowiednią dynamikę mieszance pneumatycznej biomasy, co umożliwiało dobre przemieszanie materiałów ze spalinami pierwotnymi oraz osiągnięcie odpowiedniej atmosfery ($\lambda < 1$) w strefie reakcji.

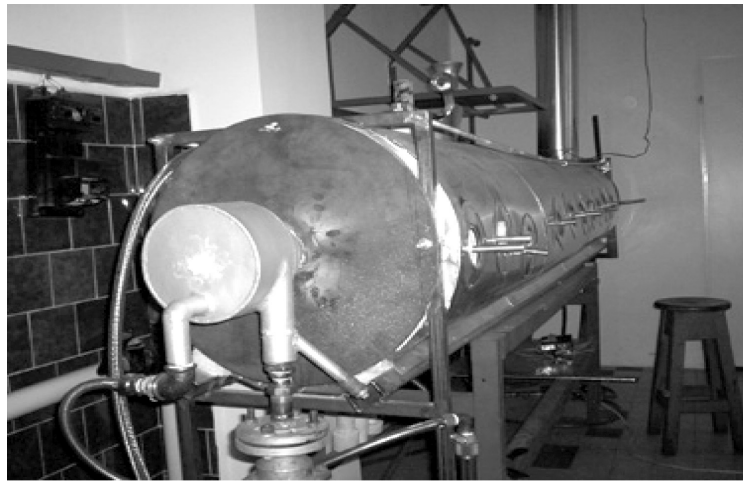
Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia badań wykorzystano cylindryczną komorę doświadczalną (rys. 1 i 2) zbudowaną z 12 kręgów betonowych (BOS 145-II) o średnicy wewnętrznej 0,34 m i sumarycznej długości 3,12 m.

Komorę zaizolowano 0,05 m warstwą wełny mineralnej i osłonięto pancerzem z blachy aluminiowej. W początkowym segmencie komory umiejscowiono przemysłowy palnik wirowy o mocy 90 kW, w którym spalano gaz ziemny o składzie: CH_4 = 96,7%, C_2H_6 = 0,7%, N_2 = 2,5%, CO_2 = 0,1%. Na końcu komory znajdowało się okno wziernikowe, umożliwiające obserwację procesów zachodzących w komorze. Na długości komory wykonano otwory pomiarowe (tabela 2), umożliwiające pomiar temperatury oraz stężeń wybranych produktów spalania, a w szczególności NO_x. Paliwa reburningowe w postaci odpadów drzewnych wprowadzano do komory za pomocą podajnika ślimakowego w odległości ok. 1/3 jej długości od palnika głównego, co podyktowane było warunkami spalania.



Rys. 1. Schemat stanowiska eksperymentalnego z komorą ceramiczną: 1 – komora, 2 – palnik wirowy, 3 – otwory pomiarowe, 4 – sonda, 5 – analizator spalin TESTO 360, 6 – komputer, 7 – termoelement PtRh-Pt, 8 – karta pomiarowa, 9 – okno wziernikowe
***Fig. 1.* The scheme of experimental stand: 1 – chamber, 2 – turbulent burner, 3 – measurement holes, 4 – probe, 5 – flue gas analyzer TESTO 360, 6 – computer, 7 – PtRh-Pt thermocouple, 8 – measuring card, 9 – eyehole window**



Rys. 2. Widok ogólny stanowiska eksperymentalnego od strony wirowego palnika głównego
Fig. 2. View of the chamber from the side of the burner

Skład spalin mierzono za pomocą analizatora TESTO 350 połączonego z komputerem, natomiast temperaturę za pomocą termoelementu aspiracyjnego

PtRh-Pt. Ilość doprowadzanych mediów gazowych tj. gazu ziemnego i powietrza mierzono za pomocą rotametrów przepływowych. Strumień paliwa reburningowego wyznaczano z zależności (1):

$$\dot{m} = \frac{m}{\tau}, \quad [kg/s] \tag{1}$$

gdzie: $\dot{m}$ – strumień paliwa reburningowego, kg/s,
m – masa wprowadzanej próbki, kg,
τ – czas podawania, s.

Tabela 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych wzdłuż komory eksperymentalnej
Table 2. Distribution of measurement points along the experimental chamber

Numer punktu pomiarowego *Number of measuring point*	Odległość od wlotu palnika *Distance from the inlet burner* [m]
1	0.100
2	0.370
3	0.640
4	0.910
5	1.180
6	1.450
7	1.720
8	1.990
9	2.260
10	2.530
11	2.900

Warunki i przebieg prowadzenia eksperymentu

Po wykonaniu prac przygotowawczych przeprowadzono badania na gorąco. Paliwem zasadniczym był gaz ziemny doprowadzany do palnika głównego. W wyniku przeprowadzenia szeregu prób ustalono ostatecznie następujące parametry pracy komory ceramicznej, a mianowicie:

– dla głównej strefy spalania:
  – strumień gazu $\dot{V}_g$ = 2,835 m^3_n/h,
  – strumień powietrza $\dot{V}_p$ = 29 m^3_n/h,
  – nadmiar powietrza λ = 1,07,
– dla strefy reburningu:
  – strumień paliwa reburningowego (tabela 3),
  – nadmiar powietrza λ = 0,95–0,78.

Udział ciepła wnoszonego przez paliwo reburningowe w całkowitej ilości ciepła doprowadzanego do komory obliczano na podstawie zależności:

$$\text{udział w cieple} = \frac{Q_{w(\text{paliwo reburningowe})} \cdot \dot{m}}{Q_{w(\text{gaz ziemny})} \cdot \dot{V}_g + Q_{w(\text{paliwo reburningowe})} \cdot \dot{m}} \quad (2)$$

gdzie: $Q_{w(\text{paliwo reburningowe})}$ – strumień paliwa reburningowego, kg/s,
$Q_{w(\text{gaz ziemny})}$ – masa wprowadzanej próbki, kg,
$\dot{V}_g$ – czas podawania, s.

W tabeli 3 zestawiono parametry charakterystyczne dla paliwa reburningowego, tj. strumień masowy oraz udział w cieple dla analizowanych materiałów.

Tabela 3. Zestawienie wybranych parametrów charakteryzujących paliwa reburningowe
Table 3. Summary of parameters characterizing the reburning fuel

Lp. *Ordinal number*	Paliwo reburningowe *Reburning fuel*	Strumień masy *Mass flux* kg/h	Udział w cieple *Heat fraction* %
1	Pył drzewny *Wood dust*	0.475	7.683
2	Odpady z tartaku *Sawmill waste*	0.480	7.372

Otrzymane wyniki stężeń tlenków azotu przeliczono na emisję wyrażoną w mg/s, a następnie określono stopień redukcji emisji NO_x w oparciu o zależność (3):

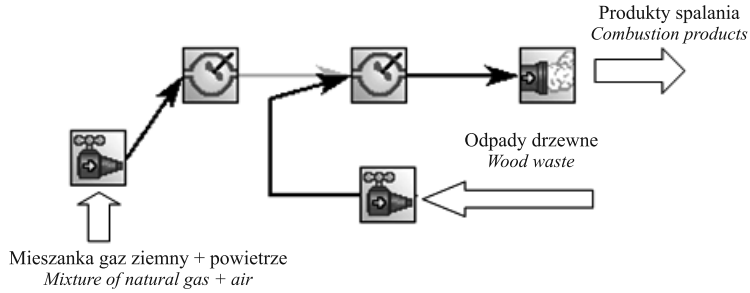
$$\text{Skuteczność redukcji emisji } NO_x = \frac{\text{emisja 1} - \text{emisja 2}}{\text{emisja 1}} \quad (3)$$

gdzie: emisja 1 – emisja NO_x na wylocie z komory bez reburningu,
emisja 2 – emisja NO_x na wylocie z komory z zastosowaniem reburningu.

Procedura modelowania

Symulacje numeryczne przeprowadzono z użyciem najnowszej wersji profesjonalnego oprogramowania CHEMKIN–PRO, opracowanym w *Sandia National Laboratories*. Do obliczeń przyjęto model rozpatrujący procesy spalania zachodzące w tzw. „reaktorze idealnego wymieszania" – *Perfectly Stirred Reaktor*. Dla spalania samego gazu ziemnego zastosowano model chemiczny spalania metanu Millera–Bowmana obejmujący 132 reakcje chemiczne oraz 35 pierwiastków i związków chemicznych, a mianowicie: H_2, H, O, O_2, OH, HO_2, H_2O_2, H_2O, N, N_2, NO, NH, NH_2, NH_3, HNO, NO_2, N_2O, CH_4, CO_2, CO, CH_3, CH_2, CH, HCO, C, C_2H_4, C_2H_3, C_2H_5, C_2H_6, CN, HCNO, HCN, HOCN, HNCO, NCO. Do modelowania procesu reburningu przyjęto model poszerzony o reakcje z udziałem siarki i jej związków, a mianowicie SO, SO_2, SO_3, SN, SH, COS, H_2S, HSO, HSO,

H_2SO, HOS, HOSHO. Ostatecznie mechanizm chemiczny obejmował 163 reakcji chemicznych i 47 pierwiastków i związków chemicznych. Schemat procedury modelowania przedstawiono na rys. 3.



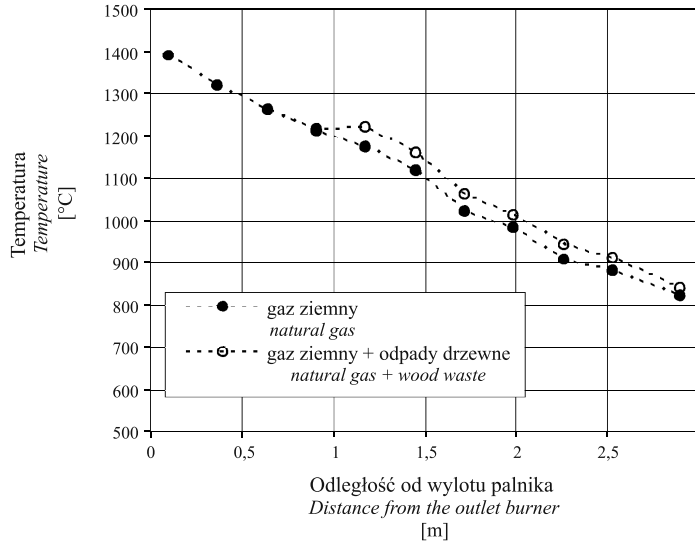
Rys. 3. Schemat procedury modelowania
Fig. 3. Scheme of numerical modelling procedure

Symulacje numeryczne przeprowadzono dla jednego paliwa reburningowego, a mianowicie dla wiór sosnowych. Analiza techniczna i elementarna ww. odpadów drzewnych została zaczerpnięta z literatury (C = 52,0%, S = 0,08%, H = 6,2%, N = 0,12%, O = 41,59%, Cl = 0,01%, W = 4%, A = 0,1%, Q_w = 20,23 MJ/kg) [Williams 2012].

W obliczeniach numerycznych przyjęto pewne uproszczenia, a mianowicie nie uwzględniono zawartości chloru w paliwie, co, ze względu na mniejszą ilość reakcji chemicznych w mechaniźmie, znacznie skróciło czas obliczeń.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono symulacje numeryczne spalania samego gazu ziemnego, natomiast w drugim współspalania z odpadami drzewnymi w postaci tzw. paliwa reburningowego. Plik wejściowy obejmował następujące dane:

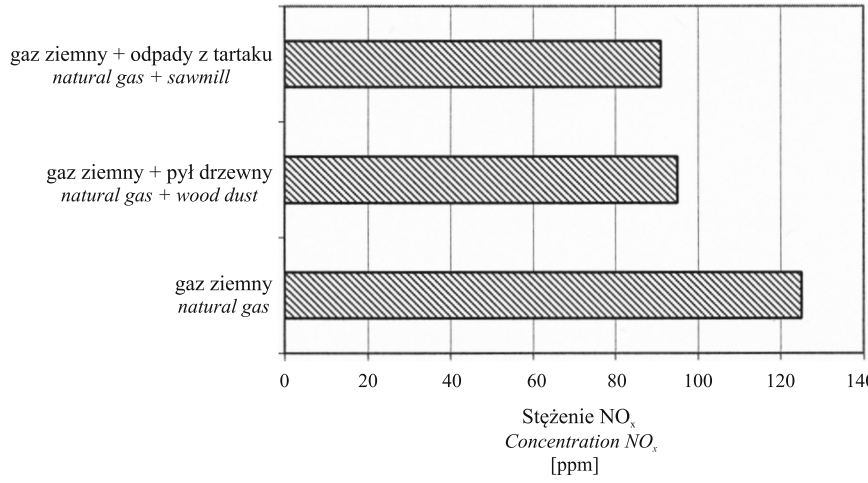
- dla spalania gazu ziemnego:
  - skład chemiczny mieszanki gaz ziemny + powietrze wyrażony w udziałach molowych: CH_4 = 0,0861; C_2H_6 = 0,0016; CO_2 = 0,0003; N_2 = 0,721; O_2 = 0,191,
  - strumień masowy mieszanki gaz ziemny+ powietrze – 0,011 kg/s,
  - ciśnienie 1 atm,
  - czas przebywania – 0,01 s,
  - profil temperatur uzyskany w ramach eksperymentu (rys. 4);
- dla spalania gazu ziemnego i odpadów drzewnych:
  - skład chemiczny odpadów,
  - strumień masowy odpadów: 0,00011 kg/s; 0,00024 kg/s,
  - udział w cieple – 8%; 15%,
  - ciśnienie – 1 atm,
  - czas przebywania – 1 s,
  - profil temperatur uzyskany w ramach eksperymentu (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład temperatur wzdłuż komory eksperymentalnej dla spalania samego gazu i współspalania gazu ziemnego z pyłem drzewnym
Fig. 4. Temperature distribution along the experimental chamber for natural gas combustion and natural gas and wood dust co-combustion

Wyniki i dyskusja

Na rys. 5 przedstawiono stężenie tlenków azotu w spalinach wylotowych dla spalania samego gazu i jego współspalania z odpadami drzewnymi.



Rys. 5. Stężenie tlenków azotu w spalinach wylotowych
Fig. 5. The concentration of nitric oxides in outlet flue gas

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno pył drzewny z zakładu stolarskiego (21%), jak i odpady drzewne z tartaku (24%) wykazują dobrą skuteczność redukcji emisji NO_x, przy niespełna 8% udziale w cieple. Niewiele wyższą skuteczność redukcji tlenków azotu uzyskano dla odpadów z tartaku, pomimo mniejszego udziału w cieple aniżeli odpady z zakładu stolarskiego. Podyktowane to było wysoką zawartością części lotnych, wyższą niż dla pyłu drzewnego.

Na rys. 6, 7 i 8 zobrazowano wyniki obliczeń numerycznych składu chemicznego spalin dla różnych warunków prowadzenia procesu. Na rys. 6 przedstawiono zrzut ekranu pliku wynikowego dla spalania samego gazu.

```
EXIT    GAS PHASE MOLE FRACTIONS

   H2              =  3.4454E-03      H               =  1.3175E-03      O2              =  2.2457E-02
   O               =  9.7118E-04      OH              =  3.0827E-03      HO2             =  2.2715E-06
   H2O2            =  2.1904E-06      H2O             =  0.1658          N               =  2.3433E-08
   N2              =  0.7155          NO              =  1.1446E-04      NH              =  1.6640E-08
   NH2             =  5.9286E-09      NH3             =  6.2682E-09      HNO             =  2.5068E-08
   NO2             =  4.7640E-09      N2O             =  2.2588E-07      CH4             =  5.2335E-05
   CO2             =  7.9260E-02      CO              =  6.3237E-03      CH3             =  9.0236E-05
   CH2             =  6.6861E-06      CH              =  2.5519E-07      HCO             =  1.4625E-07
   C               =  8.2373E-08      C2H4            =  2.1290E-06      C2H6            =  2.1869E-05
   C2H5            =  1.5661E-03      C2H3            =  3.3545E-06      CN              =  6.6248E-09
   HCNO            =  3.8045E-07      HCN             =  2.9851E-06      HOCN            =  1.7045E-08
   HNCO            =  3.8064E-08      NCO             =  4.1004E-08
```

Rys. 6. Zrzut ekranu pliku wynikowego składu chemicznego spalin na wylocie z komory dla spalania gazu ziemnego
Fig. 6. Screenshot of the output file of the flue gaschemical composition from the outlet of the chamber for natural gas combustion

Z uzyskanych drogą obliczeń numerycznych wyników badań dla spalania samego gazu ziemnego wynika, że przyjęty do obliczeń model i mechanizm spalania były poprawne, ze względu na dużą zgodność wyników. Nie jest jednak możliwa szczegółowa analiza wyników numerycznych i eksperymentalnych pod względem ilościowym, ze względu na ograniczone możliwości pomiarowe. Analizę porównawczą można przeprowadzić dla wybranych produktów spalania, wskazywanych przez analizator TESTO, a mianowicie NO_x, CO_2, O_2 i CO. Dla przykładu, porównując zmierzone wartości tlenków azotu na wyjściu z komory i te uzyskane drogą obliczeń można zauważyć niewielką różnicę, wynikającą z przyjętego do obliczeń założenia warunku idealnego mieszania. Stężenie tlenków azotu w spalinach w ramach eksperymentu wyniosło 125 ppm, natomiast obliczone 114 ppm, przy czym należy podkreślić, że jest to udział NO. Koncentracje pozostałych związków azotu, a mianowicie NO_2 i N_2O pominięto w rozważaniach, ze względu na śladowy udział w spalinach (rys. 6).

Na rys. 7 i 8 przedstawiono wyniki symulacji współspalania gazu ziemnego z odpadami drzewnymi dla dwóch różnych udziałów w całkowitym cieple wnoszonym do procesu.

Jak wynika z rys. 7 podczas, współspalania gazu ziemnego z odpadami drzewnymi obserwuje się niższe wartości stężenia NO_x aniżeli dla spalania gazu ziemnego, na skutek zachodzącej w strefie reburningu redukcji tlenków azotu.

```
EXIT    GAS PHASE MOLE FRACTIONS

    H2              =  1.2713E-03      H               =  1.7477E-04      O2              =  7.0751E-03
    O               =  1.0992E-04      OH              =  9.5859E-04      HO2             =  6.7446E-07
    H2O2            =  4.5418E-07      H2O             =  0.1778          N               =  2.6159E-09
    N2              =  0.7135          NO              =  8.4702E-05      NH              =  4.8763E-09
    NH2             =  5.0684E-09      NH3             =  1.5921E-08      HNO             =  8.0202E-09
    NO2             =  5.6394E-09      N2O             =  2.0925E-07      CH4             =  4.5301E-08
    CO2             =  9.5280E-02      CO              =  2.1191E-03      CH3             =  9.0511E-08
    CH2             =  5.8425E-09      CH              =  1.7427E-10      HCO             =  4.4968E-10
    C               =  7.9812E-08      C2H4            =  7.3333E-09      C2H6            =  5.4732E-05
    C2H5            =  1.5288E-03      C2H3            =  5.3535E-09      CN              =  1.9535E-09
    HCNO            =  3.3776E-09      HCN             =  1.8141E-06      HOCN            =  2.0170E-08
    HNCO            =  4.5369E-08      NCO             =  1.5853E-08      S               =  1.4185E-10
    SH              =  1.0893E-11      H2S             =  4.2346E-13      SO              =  1.1585E-08
    SO2             =  6.7932E-06      SO3             =  1.4673E-10      HSO2            =  8.9961E-15
    HOSO            =  2.2626E-13      HOSO2           =  1.8664E-11      SN              =  4.1626E-15
    S2              =  4.3257E-17      CS              =  8.7270E-21      COS             =  1.6197E-15
    HSNO            =   0.000          HSO             =  1.8682E-12      HOS             =  1.7450E-13
    HSOH            =  3.9282E-12      H2SO            =  6.6189E-15      HOSHO           =  2.0516E-15
    HS2             =  2.3828E-19      H2S2            =  1.7352E-25
```

Rys. 7. Zrzut ekranu pliku wynikowego składu chemicznego spalin na wylocie z komory dla spalania gazu ziemnego i odpadów drzewnych (8-proc. udział w cieple)
Fig. 7. Screenshot of the output file of the flue gas chemical composition from the outlet of the chamber for natural gas combustion and wood waste (heat fraction – 8%)

W ramach obliczeń otrzymano porównywalną skuteczność redukcji do tej uzyskanej w eksperymencie, a mianowicie 25%. Duża zgodność wyników świadczy o poprawności przyjętych do obliczeń założeń. Otrzymany w wyniku obliczeń numerycznych skład chemiczny spalin umożliwił szczegółową analizę formowanych w procesie współspalania związków chemicznych, których pomiar w warunkach eksperymentu jest często niemożliwy lub trudny do realizacji.

Należy wspomnieć, że stosowanie metody reburningu obok zmniejszenia emisji tlenków azotu może prowadzić do wzrostu emisji CO, szczególnie w przypadku, gdy jego dopalanie jest prowadzone niewłaściwie. Dlatego też, przy stosowaniu redukcji emisji NO_x metodą reburningu, należy koniecznie kontrolować emisje CO, aby nie uzyskać końcowego negatywnego efektu ekologicznego. Zwiększanie udziału paliwa reburningowego skutkuje bowiem wyższymi wartościami stężenia tlenku węgla (rys. 8). Zwiększa się również udział tlenków siarki w spalinach.

```
EXIT    GAS PHASE MOLE FRACTIONS

    H2              =  7.0262E-03      H               =  7.2456E-04      O2              =  9.3001E-04
    O               =  7.8689E-05      OH              =  9.5007E-04      HO2             =  1.0191E-07
    H2O2            =  1.7715E-07      H2O             =  0.1784          N               =  3.3948E-08
    N2              =  0.7008          NO              =  6.8864E-05      NH              =  1.9150E-08
    NH2             =  2.2482E-08      NH3             =  8.7403E-08      HNO             =  2.1663E-08
    NO2             =  5.2498E-10      N2O             =  6.7798E-08      CH4             =  6.4171E-08
    CO2             =  9.6399E-02      CO              =  1.3057E-02      CH3             =  1.2503E-07
    CH2             =  1.0864E-08      CH              =  3.4689E-09      HCO             =  7.5851E-09
    C               =  4.8279E-07      C2H4            =  5.2775E-09      C2H6            =  7.7281E-05
    C2H5            =  1.4780E-03      C2H3            =  3.0430E-09      CN              =  1.1562E-08
    HCNO            =  8.3965E-10      HCN             =  1.0658E-05      HOCN            =  3.6485E-08
    HNCO            =  8.8936E-08      NCO             =  3.0436E-08      S               =  1.3269E-09
    SH              =  1.9604E-10      H2S             =  1.3300E-11      SO              =  1.6798E-07
    SO2             =  1.4237E-05      SO3             =  1.1092E-10      HSO2            =  1.2630E-14
    HOSO            =  2.1811E-12      HOSO2           =  2.8371E-11      SN              =  1.1738E-13
    S2              =  4.5122E-15      CS              =  3.5262E-18      COS             =  5.5177E-13
    HSNO            =  2.4161E-54      HSO             =  9.0783E-12      HOS             =  9.1302E-13
    HSOH            =  1.9018E-11      H2SO            =  4.4445E-14      HOSHO           =  2.7491E-14
    HS2             =  5.4377E-17      H2S2            =  1.2878E-22
```

Rys. 8. Zrzut ekranu pliku wynikowego składu chemicznego spalin na wylocie z komory dla spalania gazu ziemnego i odpadów drzewnych (15-proc. udział w cieple)
Fig. 8. Screenshot of the output file of the flue gas chemical composition from the outlet of the chamber for natural gas combustion and wood waste (heat fraction – 15%)

Niekorzystny efekt wzrastającego stężenia CO można ograniczyć, a nawet wyeliminować poprzez doprowadzenie dodatkowego powietrza dopalającego.

Podsumowanie

Energetyczne zagospodarowanie paliw odpadowych pochodzenia roślinnego, a w szczególności analizowanych w niniejszej pracy odpadów drzewnych, jest korzystne nie tylko ze względów ekonomicznych, ale przede wszystkim ekologicznych, o czym świadczą przeprowadzone wyniki badań. Jednym ze sposobów wykorzystania odpadów drzewnych do celów energetycznych jest ich współspalanie z innymi paliwami np. z gazem ziemnym (lub węglem) w procesie reburningu, co prowadzi do redukcji zanieczyszczeń, a w szczególności do obniżenia stężenia tlenków azotu, o czym świadczą przedstawione w pracy wyniki badań. Metoda reburningu może być stosowana w wielu urządzeniach energetycznych, zarówno w energetyce zawodowej, jak i przemysłowej. Jako paliwa reburningowe używane są głównie paliwa konwencjonalne, jednak istnieje wiele przesłanek do zastosowania również biopaliw, ze względu na ich właściwości redukcyjne.

Przeprowadzone badania modelowe potwierdziły dodatkowo, że współspalanie gazu ziemnego z odpadami drzewnymi w procesie reburningu jest skuteczną metodą obniżania stężenia tlenków azotu. Wyniki tych badań były bardzo zbliżone do wyników badań eksperymentalnych, co świadczy o poprawności przyjętych założeń. Niewiele niższa wartość stężenia NO_x otrzymana w badaniach modelowych wynika z warunku idealnego mieszania reagentów, tj. głównego założenia w przyjętym do obliczeń modelu.

Ponadto, symulacje numeryczne dostarczyły danych, których uzyskanie drogą eksperymentów byłoby niemożliwe. Dane te odzwierciedlają szczegółowy skład spalin dla różnych udziałów paliwa reburningowego. Ze względu na wysokie stężenie CO jego rzeczywisty pomiar w warunkach eksperymentu nie był możliwy.

Zadawalające wyniki przedstawionych badań wymuszają potrzebę dalszych eksperymentów z zastosowaniem pulsacji ciśnieniowych, w celu zwiększenia intensyfikacji mieszania, a co za tym idzie uzyskania większej skuteczności obniżenia stężenia tlenków azotu. Należałoby jednak rozpatrzyć bardziej uproszczony model, obejmujący mniejszą liczbę reakcji i związków chemicznych, których udział w spalinach był śladowy.

Literatura

Borycka B. [2009]: Ekologiczne aspekty współspalania biomasy z odpadów owocowo-warzywnych z węglem. Energetyka i Ekologia [6]: 386–390

Cichy W., Pawłowski J. [2010]: Współspalanie węgla kamiennego i odpadów drzewnych na urządzeniach energetycznych małej mocy. Drewno. Pr. Nauk. Doniesienia. Komunikaty 53 [183]: 5–32

Golec T. [2004]: Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych. Energetyka [7/8]: 437–445

Karwasz Z. [2007]: Biomasa jako źródło wytwarzania energii odnawialnej w Polsce, Czysta Energia [8]: 16

Kordylewski W. [2000]: Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław

Kruczek H., Miller R., Tatarek A. [2003]: Spalanie i współspalanie biomasy – korzyści i zagrożenia. Gospodarka paliwami i energią [3]: 13–19

Lee D. H., Yan Y. R., Liang D. T. [2007]: Prediction of gaseous products from biomass pyrolysis through combined kinetic and thermodynamic simulations. Fuel [86]: 410–417

Magdziarz A., Wilk M., Zajemska M. [2011]: Modelling of pollutants from the biomass combustion process. Chemical and Process Engineering 32 [4]: 423–433

Nawrot P. [2007]: Biomasa – źródło nowych możliwości. Czysta energia [7]: 40–46

Ouimette P., Seers P. [2009]: Numerical comparison of premixed laminar flame velocity of methane and wood syngas. Fuel [88]: 528–533

Panek-Gondek K. [2007]: Ekologiczne aspekty wykorzystania biopaliw. Czysta Energia [7]: 62–68

Poskart M., Szecówka L. [2008]: Energy utilization of wood waste – model and experimental studies. Archivum Combustionis 28 [1–2]: 57–66

Szecówka L., Poskart M. [2008]: The effect of the reburning fuel type on the efficiency of nitrogen oxide reduction. Archivum Combustionis 28 [1–2]: 67–75

Szecówka L. [2009]: Ekologiczny efekt energetycznego wykorzystania biopaliw. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

Venturini P., Borello D., Iossa C., Lentini D., Rispoli F. [2010]: Modeling of multiphase combustion and deposit formation in a biomass-fed furnace. Energy [35]: 3008–3021

Williams A., Jones J. M., Ma L., Pourkashanian M. [2012]: Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. Progress in Energy and Combustion Science [38]: 113–137

Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. [2006]: Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. Energetyka i Ekologia[3]: 207–220

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF WOOD CO-COMBUSTION, AS A REBURNING FUEL, WITH NATURAL GAS ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF FLUE GASES

Summary

The energy utilization of waste fuels of vegetable origin, in particular wood waste, is beneficial not only for economic reasons, but primarily ecological reasons, as demonstrated by the research results obtained. One way of utilizing wood waste for energy purposes is its co- combustion with other fuels, such as natural gas (or coal), in the reburning process,

which leads to a reduction in pollution, in particular a reduction in the concentration of nitrogen oxides.

A reburning method can be used in much power equipment, both in the power industry, and industry as a whole. Although in the reburning of fuel conventional fuels are mainly used, there are many reasons to use biofuel, because of its reductive properties. The results of this research were very close to experimental, proving the accuracy of the assumptions adopted in the model. The slightly lower NOx concentration value obtained in the model research is the result of the condition of a perfect stirring of the reactants, ie, the main assumptions adopted in the calculation model. Furthermore, numerical simulations provided data that would be impossible in the experiments, namely, the detailed composition of flue gases for different reburning fuel shares. Due to the high concentration of CO, actual measurement in experimental conditions was not possible. The satisfactory research results presented in this article create the need for further experiments using a pressure pulse to increase the intensification of stirring, and thus receive a more effective reduction in nitrogen oxide concentration . However, a more simplified chemical model should also be considered, containing a smaller number of reactions and chemical compounds, whose share in the flue gases is not as large.

Keywords: co–combustion, reburning, wood wastes, pollution emission, numerical modelling