

Monika ZAJEMSKA¹, Tomasz WYLECIAŁ¹, Dariusz URBANIAK²

e-mail: zajemska@wip.pcz.pl

¹ Zakład Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Politechnika Częstochowska, Częstochowa² Instytut Maszyn Ciepłych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i informatyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa

Obliczanie spalania i współspalania biomasy w przemysłowych urządzeniach grzewczych z użyciem metod numerycznych

Wstęp

Technika obliczeniowa jest niezwykle użytecznym narzędziem, umożliwiającym analizę złożonych procesów fizycznych i chemicznych, często trudnych lub wręcz niemożliwych do zbadania w warunkach przemysłowych czy laboratoryjnych.

Na uwagę zasługuje znaczący wkład metod numerycznych w badaniu procesów energetycznego wykorzystania paliw i odpadów (np. biomasy), w szczególności do przewidywania i ograniczania szkodliwych produktów spalania, takich jak NO_x czy SO_2 [Jarnicki i Teodorczyk, 2002; Zajemska i Poskart, 2012; Magdziarz i in., 2011; Venturini i in., 2010].

W niniejszej pracy przedstawiono możliwości wykorzystania metod numerycznych do modelowania składu chemicznego produktów spalania wybranych paliw, w tym biomasy w postaci biogazu wysypiskowego. Obliczenia przeprowadzono zarówno dla samego spalania biogazu, jak i dla procesu współspalania z gazem ziemnym, w którym biopaliwo wprowadzono do komory jako tzw. paliwo reburningowe. Interpretację uzyskanych wyników ograniczono do tlenków azotu.

Energetyczne wykorzystanie biomasy

Możliwości energetycznego wykorzystania biomasy jest bardzo wiele. Może być ona bowiem wykorzystywana jako pierwotny nośnik energii w bezpośrednim procesie spalania np. słomy lub drewna, jak również może stanowić źródło wtórnych nośników energii powstających w procesach fermentacji (np. biogaz wysypiskowy) lub agrorafinacji. Duża różnorodność nadających się do energetycznego wykorzystania gatunków biomasy powoduje, że istnieje wiele technicznych rozwiązań stosowania biomasy jako nośnika energii pierwotnej.

Biomasa w zależności od rozwiązań technicznych może być wykorzystywana do celów energetycznych jako podstawowe paliwo lub może być dodatkiem przy spalaniu innych paliw. Na szczególną uwagę zasługują technologie współspalania biomasy z konwencjonalnymi paliwami, między innymi ze względu na stale zaostrzające się normy w zakresie emisji gazów odlotowych. Ekologicznym efektem procesu współspalania biomasy jest przede wszystkim znaczne obniżenie emisji gazów cieplarnianych tj. dwutlenku węgla i równocześnie toksycznych składników spalin tj. dwutlenku siarki, tlenków azotu i tlenku węgla [Golec, 2004; Williams i in., 2012].

Jednym ze sposobów energetycznego wykorzystania biomasy w procesie współspalania jest *reburning*. Metoda ta należy do pierwotnych metod redukcji emisji zanieczyszczeń, w szczególności NO_x , które formowane podczas spalania paliw w kotłach energetycznych, piecach metalurgicznych i grzewczych należą do najbardziej uciążliwych zanieczyszczeń gazowych [Bialecka, 2000; Poskart i in., 2006].

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 reagując z tlenkami azotu redukują je do azotu molekularnego. 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, będąca materiały wyjściową do produkcji biopaliw [Bialecka, 2000; Poskart i in., 2005].

Analiza teoretyczno-eksperymentalna składu chemicznego produktów spalania i współspalania biomasy

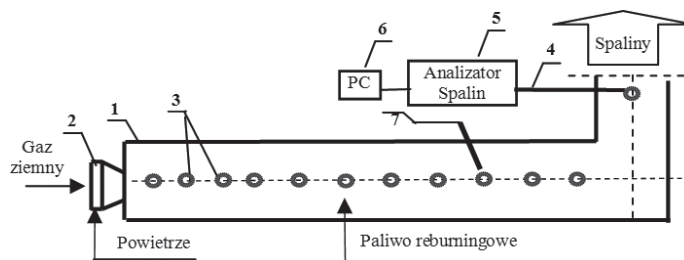
Zakres analizy

Zakres analizy obejmował:

- przeprowadzenie badań wstępnych dla określenia parametrów prowadzenia procesu, niezbędnych do sformułowania warunków początkowych w procedurze modelowania, obejmujących spalanie gazu ziemnego w palniku głównym,
- numeryczne modelowanie procesów spalania:
 - gazu ziemnego,
 - biogazu wysypiskowego
- numeryczne modelowanie procesów współspalania:
 - gazu ziemnego z biogazem wysypiskowym
- badania doświadczalne zasadnicze obejmujące spalanie i współspalanie analizowanych paliw,
- weryfikację uzyskanych obliczeń numerycznych w oparciu o dane eksperymentalne.

Badania doświadczalne

Do przeprowadzenia, zarówno wstępnego, jak i zasadniczego eksperymentu laboratoryjnego wykorzystano cylindryczną komorę wykonaną z trzech rur kwarcowych o długości 1 m każda i średnicy 0,12 m (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska eksperymentalnego z komorą kwarcową: 1 – komora, 2 – palnik główny, 3 – otwory pomiarowe, 4 – sonda, 5 – analizator spalin TESTO 350, 6 – komputer, 7 – termoelement PtRh-Pt

Poszczególne segmenty zostały wyposażone w otwory pomiarowe, a ponadto w segmencie środkowym przewidziano trzy otwory (dysze) pozwalające na doprowadzenie paliwa reburningowego. Na wlocie do komory usytuowano palnik główny.

Jako paliwa *reburningowego* używano biogazu wysypiskowego i gazu ziemnego w celach porównawczych. Ilość podawanych mediów mierzono za pomocą rotametrów.

Skład spalin i ich temperaturę w poszczególnych punktach pomiarowych mierzono za pomocą analizatora spalin *Testo 350* połączonego z komputerem.

W ramach wstępnych badań doświadczalnych wyznaczono:

- natężenie przepływu powietrza: $29 \text{ m}^3/\text{h}$,
- natężenie przepływu gazu: $2,835 \text{ m}^3/\text{h}$,
- udział paliwa reburningowego $r_b = 0,05 \div 0,17$ całkowitej ilości gazu spalanej w komorze,
- stosunek nadmiaru powietrza w głównej strefie spalania $\lambda = 1,1$,

- stosunek nadmiaru powietrza w strefie *reburningu* $\lambda = 0,91 \pm 0,75$,
- profil temperatur w komorze grzewczej.

Strumienie wprowadzanych paliw gazowych ze względu na dogodny pomiar za pomocą rotametu założono na wstępie uzyskując udział w ogólnej ilości ciepła doprowadzanego do komory. Wartości te przedstawiono w tab. 1 i 2.

Tab. 1. Parametry biogazu wprowadzanego do strefy *reburningu*

Objętościowe natężenie przepływu biogazu m^3/h	0,305	0,508	0,510	0,711	0,914	1,016
Udział w ciepłe, %	5,3	8,5	10,0	11,5	14,0	16,0

Tab. 2. Parametry gazu ziemnego wprowadzanego do strefy *reburningu*

Objętościowe natężenie przepływu gazu ziemnego m^3/h	0,15	0,25	0,30	0,35	0,45	0,50
Udział w ciepłe, %	5,3	8,5	10,0	11,5	14,0	16,0

Biogaz użyty do badań był komponentem składników o udziałach objętościowych zbliżonych do biogazu wysypiskowego. Został on spreparowany przez firmę *BOC – Gazy* i zaopatrzony w atest składu chemicznego (Tab. 3).

Tab. 3. Skład chemiczny analizowanych paliw

Składnik	Paliwo	
	Gaz ziemny	Biogaz wysypiskowy
CH ₄	0,967	0,500
C ₂ H ₆	0,006	–
N ₂	0,025	0,100
CO ₂	0,002	0,400

Wartości opałowe gazów wyniosły:

- dla gazu ziemnego $Q_w = 34,42 \text{ MJ/m}^3_n$
- dla gazu syntetycznego $Q_w = 17,70 \text{ MJ/m}^3_n$.

Modelowanie numeryczne

Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy użyciu oprogramowania komputerowego [*CHEMKIN-PRO, 2013*]. Do obliczeń przyjęto model rozpatrujący procesy spalania w tzw. reaktorze idealnego wymieszania PSR (*Perfectly Stirred Reaktor*).

Dla analizowanych procesów zaadaptowano mechanizm chemiczny spalania metanu *Millera-Bowmana* obejmujący 132 reakcje chemiczne oraz 35 pierwiastków i związków chemicznych.

Warunki początkowe sformułowano w oparciu o rzeczywiste gabaryty komory laboratoryjnej oraz parametry wyznaczone w ramach eksperymentu.

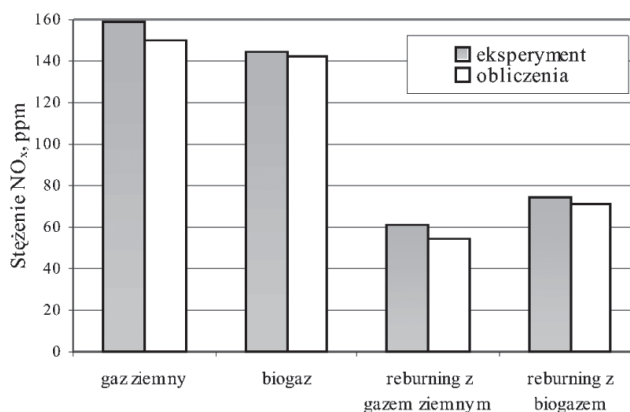
Ze względu na przyjęty do rozważań model uwzględniający zjawiska zachodzące w fazie gazowej analizie poddano jedynie paliwa gazowe, a mianowicie gaz ziemny i biogaz wysypiskowy.

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych oraz badań eksperymentalnych stężenia tlenków azotu na wyjściu z komory, zarówno dla procesu spalania, jak i współspalania.

Z przedstawionych danych wynika, że istnieje duża zgodność między wynikami uzyskanymi na drodze obliczeń numerycznych a otrzymanymi w badaniach doświadczalnych. Zaobserwowane niższe wartości stężeń dla wyników z użyciem metod numerycznych wiążą się z przyjętym w modelu założeniem o idealnym wymieszaniu reagentów.

Zastosowanie biogazu wysypiskowego jako paliwa *reburningowego* w procesie współspalania pokazało, że jest to korzystny kierunek wykorzystania tej formy biomasy, ze względu na znaczne obniżenie stężenia tlenków azotu w spalinach wylotowych. Samo spalanie biogazu nie daje takich rezultatów, co więcej wymaga dwukrotnie większych strumieni objętościowych, aniżeli gazu ziemnego.

Rys. 2. Porównanie stężenia NO_x na wyjściu z komory dla analizowanych przypadków spalania

Podsumowanie i wnioski

Energetyczne zagospodarowanie paliw odpadowych pochodzenia roślinnego, a w szczególności analizowanych w niniejszej pracy odpadów wysypiskowych, 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. Chociaż jako paliwa *reburningowe* używane są głównie paliwa konwencjonalne, to jednak istnieje wiele przesłanek do zastosowania również biopaliw ze względu na ich właściwości redukcyjne.

LITERATURA

- Białecka B., 2000. Efektywność ekologiczna i ekonomiczna zastosowania metody *reburningu*. *Gospodarka Paliwami i Energią*, nr 4, 18-21
- CHEMKIN-PRO, 2013. (02.2013): <http://www.reactiondesign.com/products/chemkin/chemkin-pro/>
- Golec T., 2004. Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych. *Energetyka*, nr 7, 437-445
- Jarnicki R., Teodorczyk A., 2002. Modelowanie numeryczne procesów spalania przy użyciu programu KIVA. *Archiwum Spalania*, nr 2, 113-145
- Magdziarz A., Wilk M., Zajemska M., 2011. Modelling of pollutants concentration from the biomass combustion process. *Chemical and Process Engineering*, 32 nr 4, 423-433
- Poskart M., Szczółka L., Radomiak H., 2005. *Zastosowanie biomasy stałej w procesie reburningu* [w:] Materiały konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt. Spalanie i współspalanie odpadów i biomasy. Wrocław 2005, 247-256
- 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*, nr 3, 207-220
- 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. DOI: 10.1016/j.energy.2010.03.038
- 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. DOI: 10.1016/j.pecs.2011.10.001
- Zajemska M., Poskart A., 2012. Zastosowanie metod numerycznych do oceny wpływu energetycznego wykorzystania paliw na stan powietrza atmosferycznego. *Ekologia i Technika*, 20, nr 5, 306-312