



# **Badanie emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych podczas spalania peletów z agro biomasy w kotle małej mocy**

*Joanna Szyszlak-Bargłowicz, Grzegorz Zajac, Tomasz Słowik  
Uniwersytet Przyrodniczy, Lublin*

## **1. Wprowadzenie**

W polskim klimacie (typowym także dla wielu regionów w Europie), najefektywniejszym sposobem ogrzewania gospodarstw domowych jest wykorzystanie energii istniejącego potencjału biomasy w oparciu o lokalnie dostępne surowce biomasy (Gula & Goryl, 2014). Ponadto uregulowania krajowe, jak i unijne zmuszą producentów energii do wykorzystania biomasy rolniczej, takiej jak słoma i biomasa uzyskana z trwałych plantacji roślin energetycznych (Krzyżaniak i in., 2016).

Aby ułatwić wykorzystanie energetyczne biomasy (transport, składowanie i spalanie) jest ona przetwarzana do postaci peletów i brykietów. W porównaniu do tradycyjnego drewna opałowego, pelety mogą zapewnić możliwość automatyzacji i optymalizacji spalania, podobne do oleju opałowego czy gazu ziemnego w połączeniu z wysoką sprawnością spalania i niską ilością szkodliwych pozostałości spalania (Mirowski, 2016).

Aspekty ekologiczne i zagrożenia zanieczyszczeniem środowiska wskazują, że pelety drzewne powinny być wykorzystywane przede wszystkim w kotłach małej mocy do ogrzewania gospodarstw domowych.

Dynamiczny rozwój rynku biomasy powoduje, że tradycyjne jej źródła nie dają możliwości pokrycia zapotrzebowania na nią. Alternatywą może być biomasa pozyskiwana z innych źródeł, które mogłyby zastąpić tradycyjne paliwa stałe czy pelety drzewne stosowane w indywidualnym ogrzewnictwie (Castellano i in., 2015; Frączek, Mudryk, & Wróbel, 2011;

Niedziółka i in., 2015; Nilsson, Bernesson, & Hansson, 2011; Obidziński, 2014; Szlachta & Jakubowska, 2013; Szmigielski i in., 2014). Przed ich szerszym wprowadzeniem do użytkowania należy wziąć pod uwagę, że efektywność techniczna i eksploatacyjna generowania ciepła w źródłach małej mocy uzależniona jest zarówno od paliwa jak i od urządzenia grzewczego. Charakterystyka techniczna urządzenia grzewczego determinuje dobór paliwa, z kolei jakość paliwa wpływa na organizację procesu spalania (Dias, Costa, & Azevedo, 2004; Juszczak, 2014; Liu i in., 2013; Ozgen i in., 2014; Roy, Dutta, & Corscadden, 2013). Należy mieć na uwadze, że ilość i rodzaj zanieczyszczeń powstających w procesie spalania biomasy są zależne nie tylko od czynników procesowych ale również od rodzaju spalanej biomasy (Zajac i in., 2017, Koniecznyński i in., 2017). W instalacjach małej mocy pelety są spalane najczęściej w kotłach automatycznych. Zazwyczaj palniki i układy podające paliwo tych kotłów są dostosowane do peletów drzewnych. Rozważając spalanie w nich peletów z innych rodzajów biomasy, należy prowadzić proces w sposób kontrolowany, tak aby nie destabilizować procesu spalania a tym samym zwiększać strat i emisji (Carvalho i in., 2013; Czop & Kajda-Szcześniak, 2013; Olsson & Kjällstrand, 2004; Qiu, 2013).

Celem przeprowadzonych badań było wykazanie i przeanalizowanie efektów ekologicznych oraz problemów eksploatacyjnych wynikających ze stosowania peletów z biomasy typu agro w kotle małej mocy przystosowanym do spalania peletów drzewnych. Określono emisję CO, NO, SO<sub>2</sub>, podczas spalania peletów: drzewnych, ze ślazu pen-sylwańskiego, miskanta olbrzymiego, słomy rzepakowej i z łusek słonecznika. Instalacja zastosowana w badaniach była typową instalacją wykorzystywaną do ogrzewania domów jednorodzinnych, przeznaczoną do spalania peletów drzewnych. Aby określić efekty ekologiczne spalania peletów innych niż drzewne podczas prowadzenia testów nie ingerowano w nastawy sterownika kotła tzn. kocioł pracował z nastawami fabrycznymi dostosowanymi do spalania peletów drzewnych. Uzyskane w trakcie badań wyniki nie stanowią ścisłych danych, lecz tylko przykłady zanotowane jednorazowo, wskazujące w przybliżeniu poziom emisji poszczególnych związków i obrazujące efekty ekologiczne stosowania alternatywnych peletów.

## 2. Materiał i metody badań

Badania emisji podczas spalania peletów drzewnych, peletów ze ślázowca pensylwańskiego, miskanta olbrzymiego, słomy rzepakowej i łusek słonecznika wykonano z wykorzystaniem kotła z automatycznym załadunkiem paliwa o mocy 10 kW. Jest to kocioł przystosowany do spalania peletów drzewnych. Wyposażony jest w palnik wykonany ze stali ogniotrwalej, który ma wloty powietrza na kilku poziomach co powoduje zwiększenie efektywności procesu spalania. Pelety są transportowane z zasobnika do palnika za pomocą podajnika ślimakowego. Podczas zeknięcia z żarem oraz w połączeniu z odpowiednią ilością powietrza dostarczanego przez liczne kanały następuje proces pirolizy biopaliwa. Powstałe podczas spalania spaliny kierowane są przez wymiennik do wylotu kominowego za pośrednictwem ciągu kominowego, wspieranego pracą wentylatora, który dodatkowo ma za zadanie dostarczenie odpowiedniej ilości powietrza dla procesu spalania. Ilość podawanego do spalania paliwa jak również ilość powietrza, które jest potrzebne do prawidłowego procesu spalania jest automatycznie dobierana przez sterownik, na podstawie wyników pomiarów zawartości tlenu w spalinach, dostarczonych przez sondę lambda.

Testy spalania prowadzono w ustalonych warunkach pracy kotła przy nastawach znamionowych. Przed rozpoczęciem pomiarów kocioł był wygrzewany przez okres 1 h, test spalania poszczególnych peletów trwał 3 h. Strumień masy paliwa wynosił około  $4 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Pelety drzewne wykorzystane w badaniach, pochodziły od jednego z największych producentów peletów w Polsce i zakupione zostały w ogólnej sieci dystrybucji. Pelety z łusek słonecznika pochodziły z Ukrainy i zostały również zakupione u dystrybutora. Pelety ze słomy rzepakowej zostały zakupione w wytwórni peletów na terenie woj. lubelskiego. Natomiast pelety ze ślázowca pensylwańskiego i miskanta olbrzymiego zostały przygotowane na potrzeby prowadzonych badań w laboratorium własnym. W celu określenia właściwości fizykochemicznych pelety zostały poddane analizie elementarnej i technicznej, wyniki analiz zestawiono w tabeli 1.

Skład spalin na wylocie z kotła mierzono za pomocą układu analizatorów produkcji firmy SIEMENS. W skład układu weszły analizatory typu ULTRAMAT 23 umożliwiające pomiar CO w zakresach 0-5%

i 0-50%, CO<sub>2</sub> w zakresie 0-50%, SO<sub>2</sub> w zakresie 0-2500 ppm i dwóch analizatorów NO o zakresach 0-1000 ppm, w tym jednego współpracującego z konwertorem NO<sub>2</sub> do NO. Pomiary te były prowadzone z wykorzystaniem referencyjnej metody IR. Pomiar stężenia O<sub>2</sub> w gazie odbywał się za pomocą analizatora typu OXYMAT 5, działającego w oparciu o referencyjną metodę wykorzystującą zjawisko paramagnetyzmu. Analizator ten posiada zakres 0-25% O<sub>2</sub>. Spaliny były próbkowane w sposób ciągły za pomocą układu sondy grzanej z filtrem ceramicznym, węża grzanego oraz układu kondycjonowania gazu.

**Tabela 1.** Właściwości fizykochemiczne badanych peletów [badania własne]  
**Table 1.** Physicochemical properties of tested pellets [own research]

Parametr	Symbol	Jednostka	Pelety drzewne	Pelety ze słomy rzepakowej	Pelety ze słazowca pensylwańskiego	Pelet z mискanta olbrzymiego	Pelety z łusek słonecznika
Wilgoć całkowita	W <sub>t</sub> <sup>r</sup>	%	6,3	9,4	6,4	7,1	9,4
Popiół	A <sup>a</sup>	%	1,3	10,4	3,8	3,16	9,9
Zawartość części lotnych	V <sup>daf</sup>	%	73,5	64,7	73,3	72,5	69,3
Węgiel	C <sup>a</sup>	%	46,8	40,1	44,6	46,3	43,6
Wodór	H <sup>a</sup>	%	6,2	5,8	6,4	6,4	6,4
Azot	N <sup>a</sup>	%	4,3	0,8	0,52	0,49	1,7
Siarka	S <sup>a</sup> <sub>A</sub>	%	0,01	0,31	0,07	0,056	0,17
Ciepło spalania	Q <sub>s</sub> <sup>a</sup>	kJ·kg <sup>-1</sup>	18 235	15 972	17 956	17 975	17 956
Wartość opałowa	Q <sub>i</sub> <sup>r</sup>	kJ·kg <sup>-1</sup>	16 741	14 476	16 402	16 440	16 457

### 3. Wyniki badań i dyskusja

W wyniku przeprowadzonych pomiarów podczas spalania poszczególnych peletów otrzymano szeregi czasowe zmian stężenia poszczególnych zanieczyszczeń, które przedstawiono na rysunkach 1-3.

Uśrednione wyniki badań emisji toksycznych składników spalin podczas spalania badanych peletów przedstawiono w tabeli 2 i porównano na rysunku 4.

Ilość i rodzaj zanieczyszczeń powstających w procesie spalania biomasy są zależne są zarówno od czynników procesowych, ale również od rodzaju spalanej biomasy (García-Maraver, Popov, & Zamorano, 2011; Rajczyk i in., 2014; Verma, Bram, & De Ruyck, 2009; Zajemska i in., 2014), co potwierdzają również otrzymane wyniki badań.

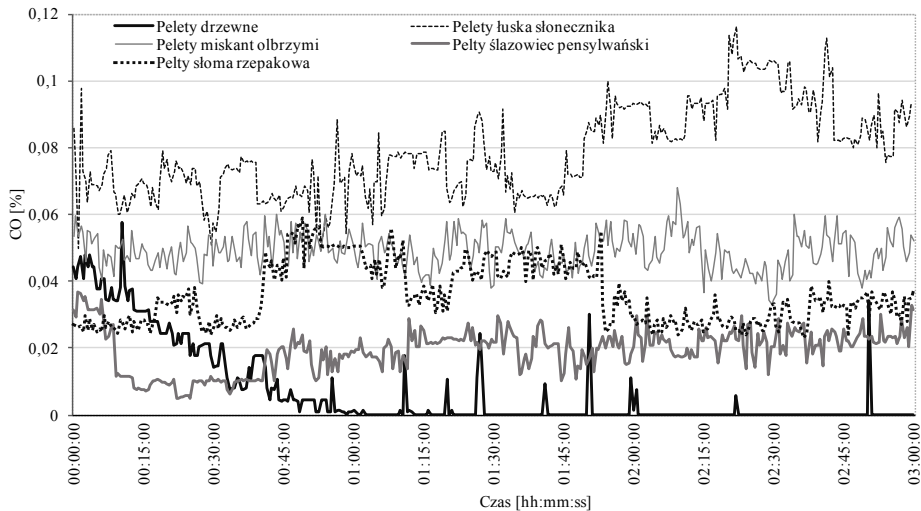
**Tabela 2.** Emisja toksycznych składników spalin podczas testów spalania [badania własne]

**Table 2.** Emission of toxic components of exhaust gases during the tests combustion [own research]

Rodzaj peletów	CO	NO	SO <sub>2</sub>	CO	NO	SO <sub>2</sub>
	mg·m <sup>-3</sup>			mg·m <sup>-3</sup> (10% O <sub>2</sub> )		
Drzewne	87,50	338,89	0,0817	70,16	271,73	0,0655
Ze słomy rzepakowej	447,50	151,02	0,7414	405,21	136,76	0,310
Ze ślazuwa pensylwańskiego	241,25	238,04	0,2443	118,85	248,31	0,120
Z miskanta olbrzymiego	613,75	170,00	0,1978	273,65	75,79	0,0882
Z łusek słonecznika	983,75	122,65	0,2895	470,21	58,62	0,1384

Emisja CO podczas testów spalania wybranych peletów różni się w sposób znaczący, najniższą wartość stwierdzono dla peletów drzewnych (tabela 2) 70,16 mg·m<sup>-3</sup> (10% O<sub>2</sub>), najwyższą dla peletów ze słomy rzepakowej 405,21 mg·m<sup>-3</sup> (10% O<sub>2</sub>). Obserwując dynamikę zmienności stężeń CO (rys. 1) widać, że podczas spalania peletów drzewnych po początkowym okresie znacznych wahań stężenia, następowało ustabilizowanie emisji tego gazu na najniższym poziomie w odniesieniu do pozostałych badanych peletów. Problemy z ustabilizowaniem pracy kotła

zaobserwowano przy zasilaniu go peletami z łuski słonecznika, zwłaszcza w końcowej fazie testu. Związane to było ze zbrzyleniem się żużla, co uniemożliwiało przesypywanie popiołu do popielnika i jednocześnie utrudniało dostęp powietrza do retorty uniemożliwiając dopalanie CO do CO<sub>2</sub>. Małą dynamiką zmian stężenia CO, świadczącą o stabilnym spalaniu, charakteryzowały się również pelety z mискanta olbrzymiego i ślazuowca pensylwańskiego, jednak emisje te były wyższe w stosunku do emisji podczas spalania peletów drzewnych. Chwilowymi problemami z dozowaniem paliwa wywołanymi zbrzyleniem się popiołu charakteryzowało się spalanie peletów z słomy rzepakowej co odzwierciedla się w przebiegu czasowym zmian stężenia CO.



**Rys. 1.** Przebieg czasowy zmian stężenia CO podczas testów spalania [badania własne]

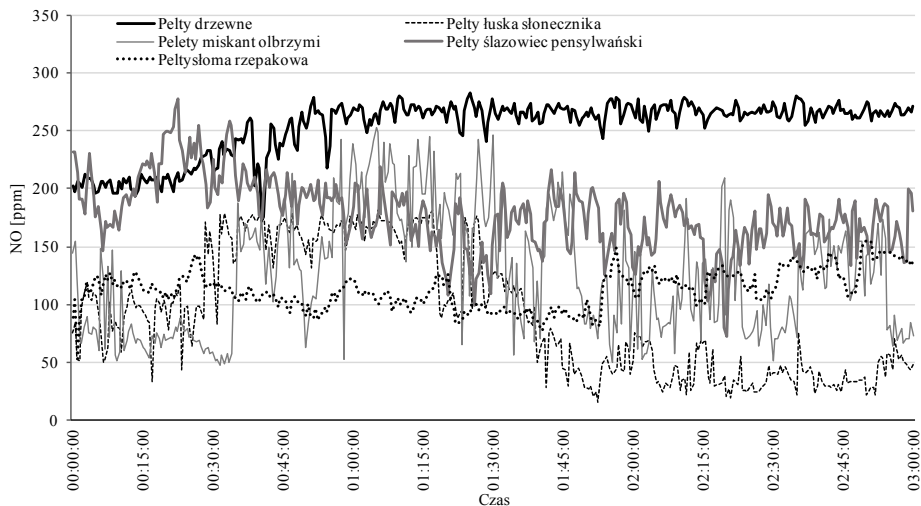
**Fig. 1.** Time line of the change CO concentration in the tests combustion [own research]

Podobne efekty spalania peletów z biomasy agro zaobserwowali w swoich badaniach inni autorzy. (Hardy i in., 2012; Musialik-Piotrowska i in., 2010).

Doniesienie literaturowe Kordylewskiego i Mościckiego (2010), opisujące doświadczenia przy spalaniu biomasy typu agro wskazuje, że ograniczenie emisji CO w palnikach retortowych poprzez zmianę współ-

czynnika nadmiaru powietrza nie zawsze jest możliwe. Zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza niejednokrotnie skutkuje zwiększeniem emisji CO (Dias i in., 2004; Wielgoński & Łechtańska, 2010).

Na cele energetyczne wykorzystuje się również pozostałości po produkcji rolno-spożywczej, po wcześniejszym wysuszeniu np. pozostałości z pomidorów (González i in., 2004), winogron (Mediavilla, Fernández, & Esteban, 2009), czy oliwek (Lajili i in., 2015). Jednak stężenia CO sięgają często kilku tysięcy  $\text{mg}\cdot\text{m}_n^{-3}$  (dla 10% zawartości tlenu w spalinach) i są znacznie wyższe niż stężenia ze spalania peletów drzewnych (w dobrych paleniskach znacznie poniżej  $1000 \text{ mg}\cdot\text{m}_n^{-3}$  (Kjällstrand & Olsson, 2004)).



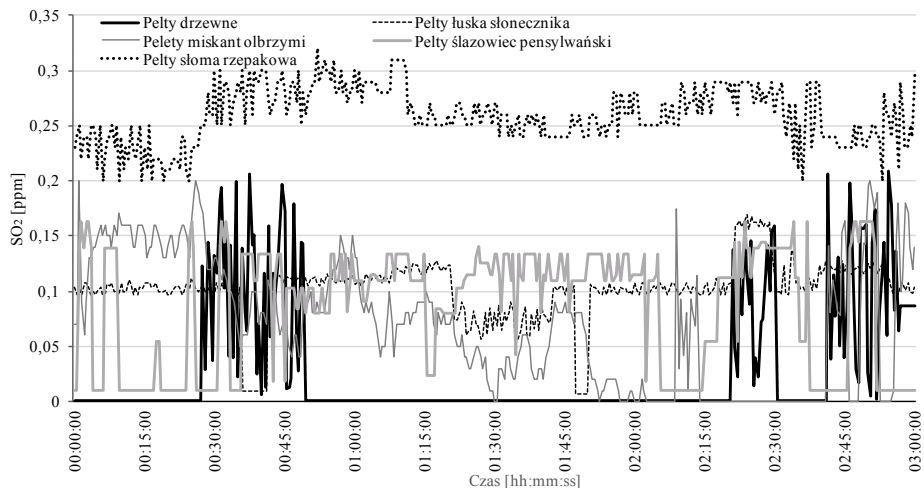
**Rys. 2.** Przebieg czasowy zmian stężenia NO podczas testów spalania [badania własne]

**Fig. 2.** Time line of the change NO concentration in the tests combustion [own research]

Stężenie NO oscylowało w zakresie  $58,62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (10%  $\text{O}_2$ ) dla peletów z łuski słonecznika do  $271,73 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (10%  $\text{O}_2$ ) dla peletów drzewnych (tabela 2). Dynamika zmian stężenia NO (rys. 2) jest odzwierciedleniem zmian stężenia CO. Najwyższym poziomem emisji NO charakteryzowało się spalanie peletów drzewnych, najniższym peletów z łuski słonecznika. O końcowym poziomie emisji tlenków azotu decyduje zawartość azotu w paliwie i warunki spalania. Małej emisji tlenków azotu sprzy-

ja zatem mała zawartość azotu w paliwie, mała wartość współczynnika nadmiaru powietrza i niska temperatura spalania (Rybak, 2006).

Badania emisji NO podczas przeprowadzonych testów spalania peletów z biomasy agro korespondują z wynikami badań przeprowadzonymi przez Musialik-Piotrowską i in. (2010) oraz Kordylewskiego i Mościckiego (2010), realizowanych na kotle o mocy 15 kW.



**Rys. 3.** Przebieg czasowy zmian stężenia  $\text{SO}_2$  podczas testów spalania [badania własne]

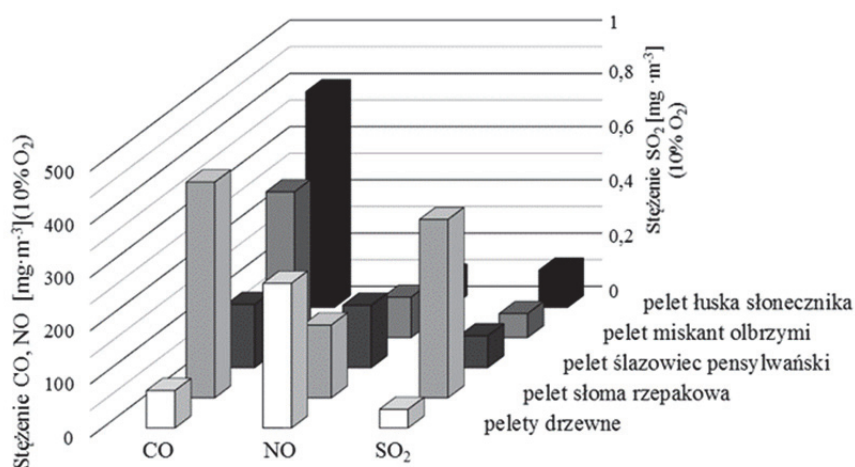
**Fig. 3.** Time line of the change  $\text{SO}_2$  concentration in the tests combustion [own research]

Najniższe stężenie  $\text{SO}_2$  stwierdzono podczas testu spalania peletów drzewnych (rys. 3). Wynosiło ono, po przeliczeniu na 10% zawartości  $\text{O}_2$  w spalinach,  $0,0655 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , a najwyższe stężenie  $\text{SO}_2$  odnotowano podczas testu spalania peletów słomy rzepakowej  $0,1384 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (10%  $\text{O}_2$ ) (tabela 2). Otrzymane wyniki badań emisji  $\text{SO}_2$  korespondują z zawartością siarki w spalanych peletach (tabela 1). Najwyższą zawartość tego pierwiastka stwierdzono w peletach ze słomy rzepakowej (0,31%), najniższą w peletach drzewnych (0,01%). Ilość emitowanego  $\text{SO}_2$  jest zależna od zawrotności siarki w paliwie. Im jest ona wyższa tym większy jest ładunek  $\text{SO}_2$  wprowadzany do środowiska (Ściążko, Zieliński, & Chmielniak, 2003).

W pracy za efekt ekologiczny przyjęto korzyści powstałe w środowisku w związku wykorzystaniem energii ze źródeł odnawialnych. Wy-



tworzenie energii z zasobów odnawialnych jest również związane z pewnym ujemnym wpływem na środowisko, a zatem efekt ekologiczny wynikający wykorzystania poszczególnych odnawialnych źródeł energii jest zróżnicowany. W przypadku spalania biopaliw stałych do głównych czynników szkodliwych powstających w procesach wytwarzania energii zaliczono: emisje CO, SO<sub>2</sub>, NO; związki te emitowane do atmosfery wywierają największy wpływ na środowisko i generują wysokie straty ekologiczne. Porównując emisję tych składników spalin podczas testów spalania (rys. 4) stwierdzono, że najniższa emisja CO i SO<sub>2</sub> miała miejsce podczas spalania peletów drzewnych, co predestynuje to biopaliwo jako najbardziej przyjazne środowisku, podczas spalania go w tego typu instalacjach.



**Rys. 4.** Porównanie emisji toksycznych składników spalin podczas testów spalania (przy 10% zawartości O<sub>2</sub>) [badania własne]

**Fig. 4.** Comparison of emission of toxic components of exhaust gases during the tests combustion (at 10% content O<sub>2</sub>) [own research]

Również pelety ze ślázowca pensylwańskiego charakteryzowały się pozytywnym efektem ekologicznym, a emisja CO i SO<sub>2</sub> podczas testu spalania była nieznacznie wyższa niż podczas testu spalania peletów drzewnych. Należy jednak odnotować, że przy spalaniu peletów drzewnych stwierdzono najwyższy poziom emisji NO (rys. 4). Ze względu na śladową ilość tego składnika w paliwie głównej przyczyny tej emisji należy upatrywać w mechanizmach termicznych powstawania NO<sub>x</sub>. Emisja NO zależy od temperatury procesu spalania, ponieważ podczas sprawnego,

procesu spalania paliwa temperatura jest wysoka, to skutkuje to wyższą emisją NO. Jednak dzięki wysokiej temperaturze spalania źródła te emitują mniej CO, benzo(a)piernu, sadzy i węglowodorów (Pająk & Tomaszewska, 2016).

W biomasie pochodzenia roślinnego zawartość siarki jest znikoma, ilość tego pierwiastka w roślinach zależna jest od gatunku rośliny oraz od jej zawartości w glebach. Emisja SO<sub>2</sub> zależy od zawartości siarki w spalanych biopaliwach, co potwierdziły również przeprowadzone badania (tabela 1, tabela 2,). Spalane biopaliwa charakteryzowały się zróżnicowaną zawartością tego pierwiastka (tabela 1), najmniej zawierały go pelety drzewne a emisja SO<sub>2</sub> podczas testu spalania tego biopaliwa była najmniejsza, wysoką zawartość siarki stwierdzono w peletach ze słomy rzepakowej a spalaniu ich towarzyszyła największa emisja SO<sub>2</sub>.

Najmniej korzystny efekt ekologiczny odnotowano podczas testu spalania peletów z łuski słonecznika i słomy rzepakowej, szczególnie w odniesieniu do emisji CO, a w przypadku słomy peletów ze słomy rzepakowej także w odniesieniu do emisji SO<sub>2</sub>. Emisja NO była niska, co wynikało między innymi z powstałych problemów eksploatacyjnych.

Stosowanie peletów z różnego rodzaju biomasy rolniczej do kotłów przystosowanych do spalania peletów drzewnych może skutkować aglomeracją popiołu, stwarzając problemy w eksploatacji palnika i wpływając na zwiększenie emisji CO oraz zmniejszenie sprawności cieplnej kotła. Zaobserwowano to w szczególności podczas testu spalania peletów z łusek słonecznika, umiarkowane uciążliwości odnotowano spalając pelety ze słomy rzepakowej, ślazuwa pensylwańskiego i miskańca olbrzymiego, a nie stwierdzono ich podczas spalania peletów drzewnych. Podobne spostrzeżenia mieli Kordylewski i Mościcki (2010) spalając pelety z biomasy agro w kotłach innej konstrukcji.

#### 4. Podsumowanie

Na skład jakościowy i ilościowy zanieczyszczeń emitowanych do powietrza ma wpływ technologia i warunki spalania paliwa, konstrukcja paleniska oraz rodzaj i jakość użytego paliwa (Szkarski & Janta-Lipinska, 2013). Nie mniej jednak, niezależnie od konstrukcji paleniska, na skład spalin ma przede wszystkim wpływ odpowiedni nadmiar powie-

trza podawanego do spalania i jakoś paliwa (Musialik-Piotrowska & Ciołek, 2012).

Aspekty ekologiczne i zagrożenia zanieczyszczeniem środowiska wskazują, że pelety drzewne powinny być wykorzystywane przede wszystkim w kotłach małej mocy do ogrzewania gospodarstw domowych, podczas gdy pelety z innych rodzajów biomasy, w tym odpadowej, powinny być spalane na dużą skalę, w sposób kontrolowany (Olsson & Kjällstrand, 2004; Czop & Kajda-Szcześniak, 2013; Carvalho i in., 2013; Qiu, 2013), co potwierdzają również zaprezentowane wyniki badań własnych.

Efekt ekologiczny wynikający z wykorzystania badanych rodzajów biopaliw kompaktowanych był zróżnicowany, najniższą emisję CO i SO<sub>2</sub> odnotowano podczas testu spalania peletów drzewnych, co predestynuje to biopaliwo jako najbardziej przyjazne środowisku. Co prawda przy spalaniu peletów drzewnych zanotowano najwyższy poziom emisji NO jednak przy niskiej zawartości azotu w paliwie wynikało to z efektywności procesu spalania.

Najmniej korzystny efekt ekologiczny stwierdzono podczas testu spalania peletów z łuski słonecznika i słomy rzepakowej, szczególnie w odniesieniu do emisji CO, a w przypadku słomy peletów ze słomy rzepakowej także w odniesieniu do emisji SO<sub>2</sub> (co wynikało z wysokiej zawartości siarki w tym biopaliwie).

Przeprowadzone testy emisyjne wykazały, że zastępowanie peletów drzewnych peletami z innych rodzajów biomasy w kotłach małej mocy nie gwarantuje poprawności spalania i zmniejszenia emisji zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery. Zaleca się spalać w tego typu kotłach pelety drzewne najwyższej jakości.

Wobec powyższego konieczne jest prowadzenie dalszych badań prowadzących do opracowania niskoemisyjnych i wysoko sprawnych technologii spalania paliw w kotłach małej mocy.

## Literatura

- Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W., & Schmidl, C. (2013). Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 104, 286-296.
- Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L. S., & Carrasco, J. E. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, 139, 629-636.

- Czop, M., & Kajda-Szcześniak, M. (2013). Environmental impact of straw based fuel combustion. *Archives of Environmental Protection*, 39(4), 71-80.
- Dias, J., Costa, M., & Azevedo, J. L. T. (2004). Test of a small domestic boiler using different pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 531-539.
- Frączek, J., Mudryk, K., & Wróbel, M. (2011). Rożnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L. - źródło biomasy do produkcji biopaliw stałych. *Inżynieria Rolnicza*, 15(6), 21-27.
- García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537-3540.
- González, J. F., González-García, C. M., Ramiro, A., González, J., Sabio, E., Gañán, J., & Rodríguez, M. A. (2004). Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler. *Biomass and Bioenergy*, 27(2), 145-154.
- Gula, A., & Goryl, W. (2014). Toward a More Environmentally Friendly Use of Biomass for Energy Purposes in Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4), 1377-1380.
- Hardy, T., Musialik-Piotrowska, A., Ciołek, J., Mościcki, K., & Kordylewski, W. (2012). Negative effects of biomass combustion and co-combustion in boilers. *Environment Protection Engineering*, 38(1), 25-33.
- Juszczak, M. (2014). Concentrations of carbon monoxide and nitrogen oxides from a 15 kW heating boiler supplied periodically with a mixture of sunflower husk and wood pellets. *Environment Protection Engineering*, 40(2), 65-74.
- Kjällstrand, J., & Olsson, M. (2004). Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 557-561.
- Koniecznyński, J., Komosiński, B., Cieślak, E., Konieczny T., Mathews, B., Rachwał, T., Rzońca, G. (2017). Research into properties of dust from domestic central heating boiler fired with coal and solid biofuels. *Archives of Environmental Protection*, 43(2), 20-27.
- Kordylewski, W., & Mościcki, K. (2010). Charakterystyka procesu spalania granulatów biomasowych w palenisku retortowym. *Archiwum Spalania*, 10(3-4), 99-108.
- Krzyżaniak, M., Stolarski, M. J., Niksa, D., Tworowski, J., & Szczukowski, S. (2016). Effect of storage methods on willow chips quality. *Biomass and Bioenergy*, 92, 61-69.
- Lajili, M., Jeguirim, M., Kraiem, N., & Limousy, L. (2015). Performance of a household boiler fed with agropellets blended from olive mill solid waste and pine sawdust. *Fuel*, 153, 431-436.

- Liu, H., Chaney, J., Li, J., & Sun, C. (2013). Control of NO<sub>x</sub> emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. *Fuel*, *103*, 792-798.
- Mediavilla, I., Fernández, M., & Esteban, L. (2009). Optimization of pelletisation and combustion in a boiler of 17.5 kW<sub>th</sub> for vine shoots and industrial cork residue. *Fuel Processing Technology*, *90*(4), 621-628.
- Mirowski, T. (2016). Wykorzystanie biomasy na cele grzewcze a ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza z sektora komunalno-bytowego. *Rocznik Ochrona Środowiska*, *18*, 466-477.
- Musialik-Piotrowska, A., & Ciołek, J. (2012). Porównanie emisji lotnych związków organicznych podczas spalania drewna. W. *Ochrona powietrza atmosferycznego : wybrane zagadnienia*. red. A. Musialik-Piotrowska, J. D. Rutkowski. 215-221. Wrocław.
- Musialik-Piotrowska, A., Kordylewski, W., Ciołek, J., & Mościcki, K. (2010). Characteristics of air pollutants emitted from biomass combustion in small retort boiler. *Environment Protection Engineering*, *36*(2), 123-131.
- Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiwicz, A., Zawiślak, K., Sobczak, P., & Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, *76*, 312-317.
- Nilsson, D., Bernesson, S., & Hansson, P.-A. (2011). Pellet production from agricultural raw materials – A systems study. *Biomass and Bioenergy*, *35*(1), 679-689.
- Obidziński, S. (2014). Pelletization of biomass waste with potato pulp content. *International Agrophysics*, *28*(1), 85-91.
- Olsson, M., & Kjällstrand, J. (2004). Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass and Bioenergy*, *27*(6), 607-611.
- Ozgen, S., Caserini, S., Galante, S., Giugliano, M., Angelino, E., Marongiu, A., & Morreale, C. (2014). Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets. *Atmospheric Environment*, *94*, 144-153.
- Pająk, L., & Tomaszewska, B. (2016). Porównanie efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych wykorzystania pompy ciepła typu woda/woda i solanka/woda do ogrzewania domu jednorodzinne. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, *47*, 152-157.
- Qiu, G. (2013). Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions. *Renewable Energy*, *50*, 94-102.
- Rajczyk, R., Bień, J., Palka, H., Pogodziński, A., & Smorąg, H. (2014). Co-Combustion of Municipal Sewage Sludge and Hard Coal on Fluidized Bed Boiler WF-6. *Archives of Environmental Protection*, *40*(3), 101-113.

- Roy, M. M., Dutta, A., & Corscadden, K. (2013). An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*, 108, 298-307.
- Rybak, W. (2006). *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Szkarowski, A., & Janta-Lipinska, S. (2013). Examination of Boiler Operation Energy-ecological Indicators During Fuel Burning with Controlled Residual Chemical Underburn. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 15, 981-995.
- Szlachta, J., & Jakubowska, J. (2013). Analiza procesu peletowania słomy zbożowej oraz zasadności dodawania otrąb zbożowych na przykładzie wybranego zakładu produkcyjnego. *Inżynieria Rolnicza*, 4(147), 365-374.
- Szmiągowski, M., Zarajczyk, J., Kowalczyk-Juško, A., Kowalczuk, J., Rydzak, L., Ślaska-Grzywna, B., Krzysiak, Z., Cycan, D., Szczepanik, M. (2014). Jakość brykietów z biomasy jako surowca do termochemicznego przetwarzania i produkcji gazu syntezowego. *Przemysł Chemiczny*, 93(11), 1986-1990.
- Ściążko, M., Zieliński, H., & Chmielniak, T. (2003). *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. Zabrze: IChPW.
- Verma, V., Bram, S., & De Ruyck, J. (2009). Small scale biomass heating systems: standards, quality labelling and market driving factors-an EU outlook. *Biomass and bioenergy*, 33(10), 1393-1402.
- Wielgosiński, G., & Łechtańska, P. (2010). Emisja zanieczyszczeń z procesu spalania biomasy. *W: A. Musialik-Piotrowska, JD Rutkowski [red.]: Współczesne osiągnięcia w ochronie powietrza atmosferycznego. PZITS Oddział Dolnośląski, Wrocław*, 391-400.
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Słowik, T., Wasilewski, J., & Kuranc, A. (2017). Emission characteristics of biomass combustion in a domestic heating boiler fed with wood and Virginia Mallow pellets. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(7), 4663-4670.
- Zajemska, M., Musiał, D., Radomiak, H., Poskart, A., Wyleciał, T., & Urbaniak, D. (2014). Formation of Pollutants in the Process of Co-Combustion of Different Biomass Grades. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4), 1445-1448.

## Research on Emissions from Combustion of Pellets in Agro Biomass Low Power Boiler

### Abstract

The dynamic development of the biomass market makes its traditional sources are not capable of covering demand for it. Alternatively, biomass can be obtained from other sources including biomass agro type that could replace wood

pellets used in individual heating systems. Before to its introduction to the wider use should be taken into account that the effectiveness of technical and operational generating heat sources of low power depends on both the fuel and the heating device. Technical characteristics of the heating equipment determines the choice of fuel, in turn, affects the quality of fuel organization of the combustion process. Considering the combustion of these pellets in other types of biomass, the process should be carried out in a controlled manner so as not to destabilize the combustion process and thereby increase the losses and emissions.

The aim of the study was to demonstrate and analyze the effects of environmental and operational problems arising from the use of pellets from biomass in agro-type boiler low power adapted to burn wood pellets. Specified emission of CO, NO, SO<sub>2</sub>, during combustion in the boiler automatic 10 kW pellets: wood, from Virginia mallow, giant miscanthus, rape straw and sunflower husk. The installation used in the study was a typical installation, used for heating houses designed to burn wood pellets.

The lowest concentration of CO and SO<sub>2</sub> were found during the combustion test wood pellets. It was, after conversion to 10% excl. O<sub>2</sub> in the exhaust gasses, respectively, CO 70.16 mg·m<sup>-3</sup>; SO<sub>2</sub> 0.0655 mg·m<sup>-3</sup>. The highest concentration of CO were found during the combustion test pellets from sunflower husk: 470.21 mg·m<sup>-3</sup> (10% excl. O<sub>2</sub>), and the highest concentration of SO<sub>2</sub> was recorded during the combustion test pellets from rape straw 0.1384 mg·m<sup>-3</sup> (10% excl. O<sub>2</sub>). The results obtained SO<sub>2</sub> emissions correspond to the sulfur concentration in burned pellets. The highest concentration of NO (10% excl. O<sub>2</sub>) found during the combustion test wood pellets 271.73 mg·m<sup>-3</sup> and pellets from Virginia mallow 248.31 mg·m<sup>-3</sup>, slightly lower than the combustion of rape straw 136.76 mg·m<sup>-3</sup> and the lowest during the combustion of pellets from giant miscanthus and sunflower husk 75.79 mg·m<sup>-3</sup> and 58.62 mg·m<sup>-3</sup>.

The biggest problems with the stabilization of the boiler occurred while burning pellets from sunflower husk, which resulted in the highest emissions of carbon monoxide in the exhaust gasses resulting from incomplete combustion of fuel.

## **Streszczenie**

Dynamiczny rozwój rynku biomasy powoduje, że jej tradycyjne źródła nie dają możliwości pokrycia zapotrzebowania na nią. Alternatywą może być biomasa pozyskiwana z innych źródeł w tym biomasa typu agro, która mogłyby zastąpić pelety drzewne stosowane w indywidualnym ogrzewnictwie. Przed jej szerszym wprowadzeniem do użytkowania należy wziąć pod uwagę, że efektywność techniczna i eksploatacyjna generowania ciepła w źródłach małej mocy uzależniona jest zarówno od paliwa jak i od urządzenia grzewczego. Charakterystyka

techniczna urządzenia grzewczego determinuje dobór paliwa, z kolei jakość paliwa wpływa na organizację procesu spalania. Rozważając spalanie w nich peletów z innych rodzajów biomasy, należy prowadzić proces w sposób kontrolowany, tak aby nie destabilizować procesu spalania a tym samym zwiększać strat i emisji.

Celem przeprowadzonych badań było wykazanie i przeanalizowanie efektów ekologicznych i problemów eksploatacyjnych wynikających ze stosowania peletów z biomasy typu agro w kotle małej mocy przystosowanym do spalania peletów drzewnych. Określono emisję CO, NO, SO<sub>2</sub>, podczas spalania w kotle automatycznym, o mocy 10 kW peletów: drzewnych, ze ślazuwca pensylwańskiego, miskanta olbrzymiego, słomy rzepakowej i z łusek słonecznika. Instalacja zastosowana w badaniach była typową instalacją wykorzystywaną do ogrzewania domów jednorodzinnych przeznaczoną do spalania peletów drzewnych.

Najniższe stężenie CO i SO<sub>2</sub> stwierdzono podczas testu spalania peletów drzewnych. Wynosiło ono, po przeliczeniu na 10% zaw. O<sub>2</sub> w spalinach, odpowiednio: CO 70,16 mg·m<sup>-3</sup>; SO<sub>2</sub> 0,0655 mg·m<sup>-3</sup>. Najwyższe stężenie CO stwierdzono podczas testu spalania peletów z łusek słonecznika: 470,21 mg·m<sup>-3</sup> (10% zaw. O<sub>2</sub>), a najwyższe stężenie SO<sub>2</sub> odnotowano podczas testu spalania peletów ze słomy rzepakowej 0,1384 mg·m<sup>-3</sup> (10% zaw. O<sub>2</sub>). Otrzymane wyniki badań emisji SO<sub>2</sub> korespondują z badaniami zawartości siarki w spalanych paletach. Najwyższe stężenie NO (10% zaw. O<sub>2</sub>) stwierdzono podczas spalania peletów drzewnych 271,73 mg·m<sup>-3</sup> i peletów ze ślazuwca pensylwańskiego 248,31 mg·m<sup>-3</sup>, nieco niższa podczas spalania słomy rzepakowej 136,76 mg·m<sup>-3</sup> a najniższe podczas spalania peletów z miskanta olbrzymiego i łusek słonecznika 75,79 mg·m<sup>-3</sup> i 58,62 mg·m<sup>-3</sup>.

Największe problemy z ustabilizowaniem pracy kotła wystąpił podczas spalania peletów z łusek słonecznika, co przełożyło się na najwyższą emisję tlenku węgla w spalinach, wynikającą z niezupełnego spalania paliwa.

**Słowa kluczowe:**

pelety, spalanie biomasy, kotły biomasowe

**Keywords:**

pellets, biomass combustion, biomass boilers