



## Obciążenie środowiska produktami spalania peletów z biomasy roślinnej w kotle górnego spalania

*Artur Kraszkiewicz<sup>\*</sup>, Małgorzata Stryjecka<sup>\*\*</sup>,  
Natalia Nowosad<sup>\*\*</sup>, Sławomir Kocira<sup>\*</sup>*

*<sup>\*</sup>Uniwersytet Przyrodniczy, Lublin*

*<sup>\*\*</sup>Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Chełm*

### 1. Wprowadzenie

Rozwój odnawialnych źródeł energii stanowi jeden z głównych celów polityki energetycznej Unii Europejskiej. Techniczny potencjał energii odnawialnej w UE wynosi według szacunków 40 000 PJ·rok<sup>-1</sup>, co odpowiada około 60% zużycia energii pierwotnej. Przy czym w strukturze udziału tych źródeł energii w zużyciu energii pierwotnej dominuje biomasa z 51% udziałem (Molo 2016).

Polska ze względu na swoje warunki naturalne ma ogromny potencjał dla produkcji biomasy, która może być pozyskiwana zarówno z lasów, jak również z celowych upraw roślin energetycznych lub jako produkt uboczny z prowadzonej produkcji rolniczej albo przerobu jej produktów. Jednocześnie należy brać pod uwagę zagrożenia środowiskowe wynikające z nadmiernego pozyskania biomasy pochodzenia rolniczego na cele energetyczne. Przykładem może być słoma której spalanie całkowitej produkcji prowadzi do zmniejszenia zawartości substancji organicznej w glebie (Kuboń i in. 2018).

Biomasa roślinna jest surowcem bardzo zróżnicowanym pod względem cech fizycznych i chemicznych a w aspekcie wykorzystania na cele energetyczne charakteryzowana jest najczęściej zawartością wilgoci i części lotnych, wartością opałową oraz zawartością węgla, wodoru,

azotu i siarki. Parametry te zależą od cech fizjologicznych różnych gatunków i odmian roślin, jak również fazy rozwoju, części rośliny, siedliska, terminu i metody zbioru, transportu, przechowywania i innych czynników (Demirbas 2004, Graham i in. 2016, Jenkins i in. 1998, Krzyżaniak i in. 2014, Szyszlak-Bargłowicz i in. 2006, Wang i in. 2011).

Paliwa pochodzenia biomasowego zawierają także pewne ilości substancji mineralnej, która po spaleniu stanowi główną część popiołu. Istotna jest nie tylko ilość popiołu, lecz również jego właściwości, do których należą temperatura spiekania, mięknięcia i topnienia. W biomasie roślinnej z reguły zawartość popiołu nie powinna przekraczać 6% (Demirbas 2004, Kalembasa 2006, Kowalczyk-Juško 2017, Shao i in. 2012). Skład chemiczny popiołu wpływa na przebieg procesu spalania, wybór technologii, emisję stałych cząstek a po zakończeniu spalania na sposób jego wykorzystania. Ponowne zagospodarowanie popiołu determinowane jest jego właściwościami chemicznymi. Popioły uzyskane ze spalania słomy zawierają stosunkowo mało wapnia, dużo potasu i krzemu, a zatem topią się przy znacznie niższych temperaturach niż popioły z paliwa drzewnego lub węgla kamiennego (Kraszkiewicz i in. 2017, Obernberger i in. 2006, Róg 2011). Przy czym dłuższy okres wegetacji drzew niż innych roślin użytkowanych na cele energetyczne, sprzyja zwiększaniu w nich zawartości metali ciężkich. Metale ciężkie znajdujące się w biomasie podczas procesu spalania ulatniają się lub pozostają w popiele i w konsekwencji przedostają się do środowiska przyrodniczego (Rybak 2006).

Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne w Polsce zyskuje na znaczeniu. Jednostki produkcyjne energetyki zawodowej, które wykorzystują biomasę do spalania i współspalania, są zobowiązane stopniowo zwiększać ilość biomasy pochodzącej ze źródeł rolniczych zamiast drewna z lasów. W budownictwie jednorodzinym stosowane są najczęściej indywidualne źródła ciepła (kotły c.o., piece ceramiczne, piece metalowe i kuchenne), przy czym szacunkowa liczba tych urządzeń opalanych głównie węglem kamiennym i drewnem szacowana jest na ponad 17 milionów sztuk. Ta grupa tradycyjnych kotłów i pieców małej mocy charakteryzuje się ręcznym, okresowym dozowaniem paliwa, a tym samym wysoką emisją zanieczyszczeń do atmosfery (Kubica 2007).

Spalanie jest zjawiskiem złożonym. Składa się z wielu zjawisk fizycznych i chemicznych rozkładu cieplnego i spalania paliwa, przebiegających w określonej przestrzeni i czasie. Analiza procesu spalania wymaga znajomości właściwości paliw i ich oddziaływania na jego przebieg (Van

Loo i Koppejan 2008, Villeneuve i in. 2012, Juszczak 2014, Liu i in. 2013, Ozgen i in. 2014). Natomiast 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). Zastrzega się, że spalanie biomasy, jest procesem neutralnym dla środowiska przez pryzmat emisji CO<sub>2</sub>, jednak w pewnych warunkach spalanie biopaliw w indywidualnych systemach grzewczych, może powodować poważne zagrożenie w skali lokalnej dla środowiska i zdrowia ludzi (Chao et al. 2008, Heykiri-Acma 2003, Li et al. 2015).

Biorąc pod uwagę cechy energetyczne biomasy, podjęto badania, których celem było ilościowe określenie wybranych produktów gazowych i stałych spalania peletów ze słomy pszennej, żytniej i trocin sennych. W grupie produktów gazowych określono emisję CO, NO i SO<sub>2</sub>, natomiast w grupie produktów stałych (w popiele) określono zawartość wybranych makro- i mikroelementów oraz metali ciężkich.

## 2. Materiał i metody badań

Badaniom poddano pelety ze słomy pszennej, żytniej i trocin sennych. Materiał do badań pozyskano z gospodarstwa rolnego i tartaku zlokalizowanych we wschodniej części województwa lubelskiego. Proces zagęszczania przeprowadzono w granulatorze z matrycą płaską o średnicy otworów 8 mm. Dla otrzymanych biopaliw oznaczono podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne, przy czym posługiwano się następującymi metodami:

- wilgoci – metodą wagową według normy PN-EN 18134-3:2015,
- gęstości – obliczono na podstawie średnicy i długości peletów z wylosowanej próby o masie 100 g±1g, posługując się następującym wzorem:

$$\rho_w = \frac{4 \cdot 10^6 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot l} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho_w$  – gęstość drewna, brykietów lub peletów (kg·m<sup>-3</sup>),
  - m – masa porcji peletów (g),
  - d – średnia średnica peletów (mm),
  - l – suma długości peletów w porcji paliwa (mm).
- wartości opałowej – obliczając po uprzednim oznaczeniu ciepła spalania według normy PN-EN 18125:2017;
  - popiołu – według normy PN-EN18122:2016.

Wartości średnie otrzymanych wyników (z trzech powtórzeń) charakteryzujących wykorzystane biopaliwa przedstawiono w tabeli 1.

Testy spalania zgromadzonego materiału badawczego przeprowadzono przy użyciu stanowiska badawczego, którego integralnym elementem był kocioł górnego spalania z rusztem stałym, ładowany okresowo. Załadunek paliwa i usuwanie popiołu odbywało się ręcznie. Z komina następował pobór spalin w odległości 1 m od czopucha kotła. Sonda pomiarowa podłączona była do suszarki gazów spalinowych PGD-100 firmy Madur Eljack Electronics, z której spaliny trafiały do analizatora spalin.

**Tabela 1.** Właściwości fizyczne i chemiczne badanych peletów  
**Table 1.** Physical and chemical properties of tested pellets

Parametr	Symbol	Jednostka	Pelety ze słomy pszennej	Pelety ze słomy żytniej	Pelety z trocin sosnowych
Wilgoć całkowita	$W_t^r$	%	10,65	10,55	9,62
Gęstość	–	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1130	1034	965
Ciepło spalania	$Q_s^a$	$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	18,58	18,47	19,00
Wartość opałowa	$Q_i^r$	$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	16,32	16,23	16,96
Popiół	$A^a$	%	2,31	3,40	0,98

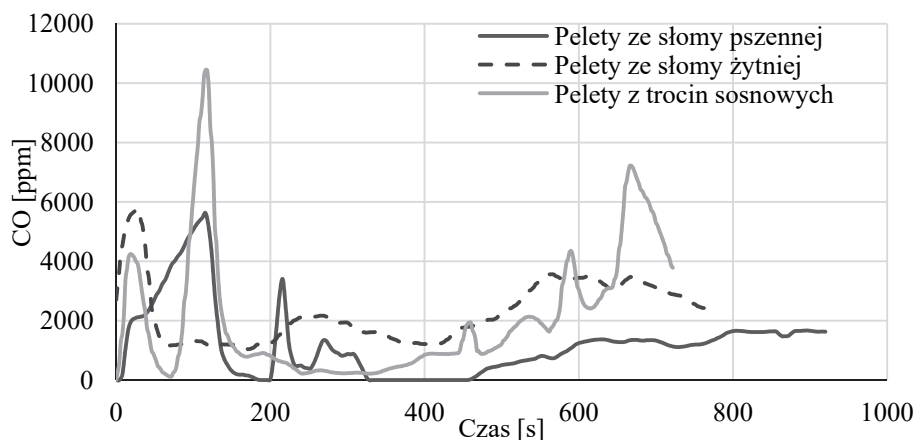
W trakcie testów wykorzystano przenośny analizator spalin Photon tej samej firmy co suszarka gazów. Jest to urządzenie pracujące na bazie sensorów podczerwieni (NDIR) i elektrochemicznych, przy czym pomiar z czujników NDIR dotyczy gazów: CO, NO, SO<sub>2</sub>, a elektrochemicznych – O<sub>2</sub>. Przebieg testów polegał na spalaniu 1 kg wymienionych wcześniej peletów. Przy pomocy wentylatora pod ruszt kierowano strumień powietrza z prędkością 2 m·s<sup>-1</sup>. Pomiaru składu gazów spalinowych prowadzono ciągle, tj. od momentu inicjacji (zapłonu) do wygaśnięcia reakcji. Wyniki zapisywane były do bazy danych analizatora co 2 s. Przeciętny czas badania uzależniony był od czasu spalania danego rodzaju biopaliwa. Uzyskane wyniki stężeń CO, NO i SO<sub>2</sub> w spalinach odniesiono do strumienia objętości spalin suchych o zawartości 10% tlenu

i warunków normalnych ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) w  $0^\circ\text{C}$  i 1013 mbar według wytycznych zawartych w normie PN-EN 303-5:2012.

Popiół do badań laboratoryjnych pobrano z popielnika kotła a następnie wygrzewano w piecu laboratoryjnym w temperaturze  $550^\circ\text{C}$  przez 2 godz. W przygotowanych porcjach aparatem IPC-OES Spectro Arcos określono zawartość wybranych pierwiastków: fosfor, potas, wapń, magnez, żelazo, mangan, miedź, cynk, ołów, nikiel, chrom, rtęć.

### 3. Wyniki badań i dyskusja

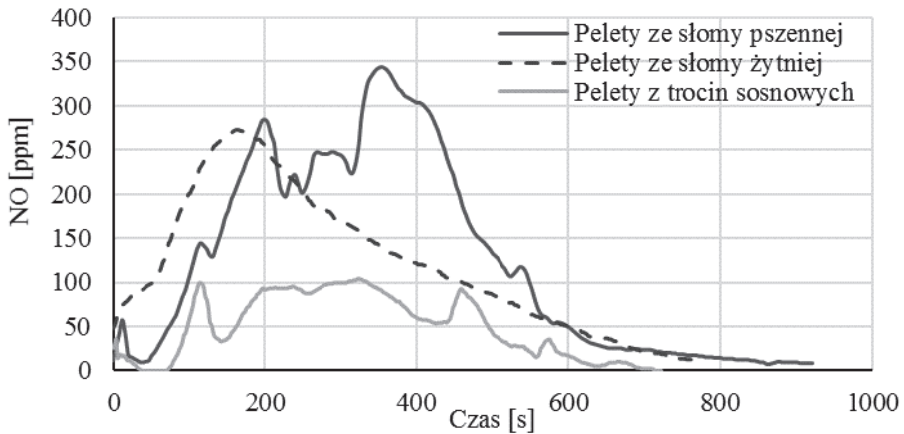
Zarejestrowany podczas badań rozkład w czasie parametrów spalin przedstawiono na rysunkach 1-3.



**Rys. 1.** Zmiany stężenia CO w procesie spalania badanych peletów

**Fig. 1.** Changes of the concentration of CO in the combustion of tested pellets

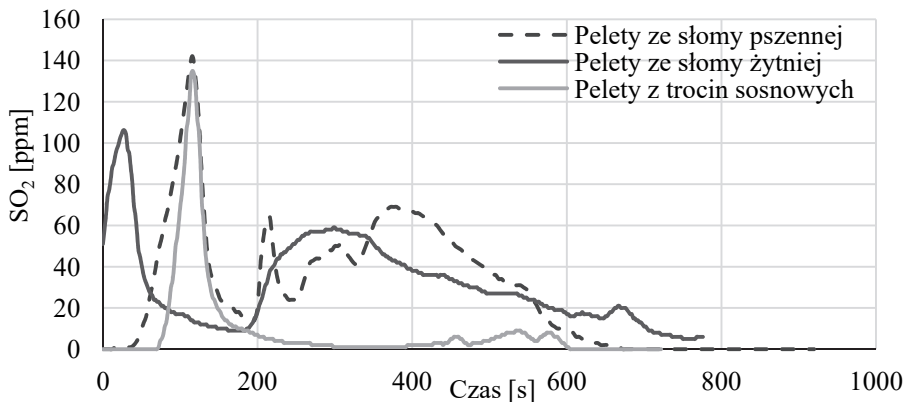
Podczas spalania na ruszcie peletów wykonanych z analizowanych surowców obserwuje się obszary spalania właściwego i dopalania. Wyraźnie widoczna jest zwiększona emisja CO w początkowej fazie procesu spalania (rysunek 1). W miarę rozwoju przebiegu tego procesu i zwiększeniu się propagacji płomienia oraz przyrostu temperatury zaznacza się także większa obecność tlenków azotu szczególnie przy spalania peletów ze słomy (rysunek 2).



**Rys. 2.** Zmiany stężenia NO w procesie spalania badanych peletów

**Fig. 2.** Changes of the concentration of NO in the combustion of tested pellets

Zmiany stężenia  $\text{SO}_2$  w spalinach posiadają zbliżoną tendencję rozkładu do emisji CO z wyraźnie widocznym maksimum w początkowej fazie spalania (rysunek 3). Istotne jest również, że podczas dopalania się pozostałości koksowej z porcji spalanych biopaliw zaobserwowano ponowne zwiększenie się wartości stężenia CO.



**Rys. 3.** Zmiany stężenia  $\text{SO}_2$  w procesie spalania badanych peletów

**Fig. 3.** Changes of the concentration of  $\text{SO}_2$  in the combustion of tested pellets

Charakterystyczne wartości wskaźników emisji CO, NO,  $\text{SO}_2$ , zawartość  $\text{CO}_2$  w spalinach i temperaturę spalin przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Wskaźniki emisji CO, NO, SO<sub>2</sub>, zawartość CO<sub>2</sub> w spalinach I temperatura spalin podczas spalania peletów ze słomy pszennej, żytniej i trocin sosnowych

**Table 2.** Indicators of CO, NO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> content in the exhaust gas and the temperature of the exhaust gases during the combustion of pellets from wheat straw, rye and pine sawdust

Rodzaj peletów	Wartości	CO mg·m <sup>-3</sup>	NO mg·m <sup>-3</sup>	SO <sub>2</sub> mg·m <sup>-3</sup>	CO <sub>2</sub> %	Temperatura gazów spalinowych °C
Pelety ze słomy pszennej	min.	0	0	0	0	98,6
	max.	85810	1773	2328	10,94	597
	średnia	7361	167	111	4,32	294
	przy max. CO <sub>2</sub>	1274	253	94	–	312,8
Pelety ze słomy żytniej	min.	0	0	0	0	99
	max.	116617	1778	4697	10,24	536,10
	średnia	11393	282	286	4,77	330,91
	przy max. CO <sub>2</sub>	1345	296	45	–	529,5
Pelety z trocin sosnowych	min.	0	0	0	0	97,6
	max.	81926	1497	4294	10,67	689
	średnia	15025	154	196	5,49	389
	przy max. CO <sub>2</sub>	237	119	2	–	641,7

W toku badań własnych stwierdzono, że podczas spalania rozpatrywanych peletów największe emisje CO osiągnięto podczas początkowej fazy spalania podczas której wskaźniki emisji przekraczały normy spalania. W okresie spalania właściwego, przy największej emisji CO<sub>2</sub>, następowała znaczna redukcja emisji CO przy czym najmniejsza wartość, około 4-krotnie mniejsza w porównaniu do peletów ze słomy zaobserwowano podczas spalania peletów z trocin sosnowych (tabela 2).

Jednocześnie wartości te były porównywalne z danymi prezentowanymi przez innych badaczy (Jewiarz i Kubica 2012, Kordylewski 2008). Pozostałe analizowane składniki gazów spalinowych podczas te-

stów zbliżone były do wartości literaturowych (Jewiarz i Kubica 2012, Kordylewski 2008, Szyszlak-Bargłowicz i in. 2017). Jednak interpretacja otrzymanych wyników dotyczących emisji CO, NO i SO<sub>2</sub> odnosi się do przyjętych kryteriów spalania, którego charakterystyczną cechą było wykorzystanie rusztowego systemu spalania z zapłonem paliwa od dołu i dystrybucją powietrza pod ruszt. Tym samym analiza porównawcza otrzymanych wyników sklasyfikowanych w poszczególnych testach spalania jest utrudniona, ponieważ dostępne w literaturze dane związane z emisją CO, NO oraz SO<sub>2</sub>, często dotyczą innych konstrukcji urządzeń grzewczych, a podawane wartości to średnie dla całego procesu spalania, które nie uwzględniają podziału na poszczególne etapy spalania. Według Kordylewskiego (2008) za Juszczakiem (2002) podczas spalania drewna z palenisk jest emitowany tlenek węgla, typowo w zakresie 100-1000 mg·m<sup>-3</sup>, ale w niekorzystnych warunkach spalania jego udział w spalinach może osiągnąć nawet kilka procent. Natomiast emisja NO<sub>x</sub>, w której 95% stanowią NO, przy spalaniu drewna zawiera się w przedziale od 170 do 920 mg·m<sup>-3</sup>, a ze względu na znikomą zawartość siarki w drewnie brak jest emisji SO<sub>2</sub>. Natomiast Jewiarz i Kubica (2012) dla słomy żytniej, pszennej i rzepakowej podają wskaźniki emisji CO, NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub> przy 10% zawartości O<sub>2</sub> w spalinach, które odpowiednio zawierają się w przedziałach 1281,7-4283,6; 166,6-206,6; 87,7-109,7 mg·m<sup>-3</sup>. Przy czym w badaniach Temmermana i in. (2011) analizowane jest m.in. spalanie drewna dla którego wskaźniki emisji CO, NO i SO<sub>2</sub> przy 13% zawartości O<sub>2</sub> w spalinach wynoszą odpowiednio 189,98; 144,09 i 14,06 mg·m<sup>-3</sup>. Natomiast standardy dotyczące kotłów i palenisk małej mocy do spalania paliw stałych zapisane w normie PN-EN 303-5:2012 dla kotłów o mocy nominalnej do 50 kW na paliwa stałe z ręcznym zasypem paliwa wskazują na możliwość maksymalnej, dopuszczalnej emisji CO do wartości 5000 mg·m<sup>-3</sup> przy 10% zawartości O<sub>2</sub> w spalinach.

Wybrane pierwiastki oznaczone w popiele, przedstawiono w tabeli 3. W porównaniu do peletów ze słomy w popiele powstałym przy spalaniu peletów z trocin sosnowych zaobserwowano mniejsze wartości dla wszystkich analizowanych pierwiastków. Zawartość makro- i mikroelementów w popiołach z analizowanych biopaliw była porównywalna z danymi literaturowymi (Jewiarz i Kubica 2012, Kalembasa 2006). W aspekcie obciążenia środowiska przyrodniczego popiołami ze spalania biopaliw ważna jest zawartość w nim metali ciężkich.



**Tabela 3.** Skład chemiczny popiołu ze spalania badanych peletów**Table 3.** Chemical composition of ash from the combustion of tested pellets

Wyszczególnienie		Jednostka	Pelety ze słomy pszennej	Pelety ze słomy żytniej	Pelety z trocin sosnowych
Makroelementy	P	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	17,9	10,7	10,9
		$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	1,00	0,37	0,11
	K	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	227,8	194,8	164,3
		$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	12,81	6,70	1,62
	Ca	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	72,7	64,1	3,9
		$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	4,09	2,21	0,04
Mg	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	5,8	6,1	9,6	
	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,33	0,21	0,09	
Mikroelementy	Mn	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	1,2	1,2	1,3
		$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,04	0,04	0,01
	Fe	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	3,5	3,2	2,1
		$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,12	0,11	0,02
Metale ciężkie	Cu	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	34,2	30,7	27,1
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	1,17	1,06	0,27
	Zn	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	267,7	277,8	193,0
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	9,14	9,55	1,90
	Pb	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	4,4	3,85	2,87
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,15	0,13	0,03
	Cd	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	0,3	0,14	0,05
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,01	0,005	0,0004
	Ni	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	1,4	1,24	0,73
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,05	0,04	0,01
	Cr	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	5,7	5,21	4,12
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,19	0,18	0,04
Hg	$\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ popiołu	0,67	0,24	0,00	
	$\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. peletu	0,02	0,01	0,00	

Brak wyników badań dotyczących zawartości tych związków w glebie uniemożliwia wnioskowanie co do przyczyny nagromadzenia tych pierwiastków w rozpatrywanych peletach. Stopień potencjalnego zagrożenia środowiska wg Kabaty-Pendias i Pendiasa (1979) oraz Ociepy-Kubickiej i Ociepy (2012) przedstawia się następująco: miedź, cynk, ołów, kadm i rtęć powodują bardzo wysokie zagrożenie. Toksyczność tych pierwiastków zależy nie tylko od ich poziomu stężenia w środowisku, lecz przede wszystkim od ich biochemicznej roli jaką spełniają w procesach metabolicznych. Zawartość metali ciężkich w biomase jest bardzo zróżnicowana. Według Grzybek (2004) w drewnie drzew iglastych zawartość analizowanych metali ciężkich przedstawia się następująco: kadm 0,26; chrom 4,50; miedź 3,45; rtęć 0,05; nikiel 4,23; ołów 2,38; cynk 37,6 mg·kg<sup>-1</sup> s.m. Przy czym w drewnie wierzby energetycznej (konkurencyjnego surowca) zawartość tych pierwiastków wynosi odpowiednio: kadmu 0,61; chromu 0,58; miedzi 3,22; rtęci 0,05; niklu 0,26; ołowiu 0,10; cynku 67,7 mg·kg<sup>-1</sup> s.m. Natomiast Kalembasa (2006) w swoich badaniach podaje, że w popiele z biomasy wierzby krzewiastej znajdowało się: ołowiu 0,17; kadmu 0,06; chromu 0,06; miedzi 0,65; cynku 13,42 i niklu 0,47 g·kg<sup>-1</sup>.

W badanych peletach zawartość metali ciężkich była mniejsza niż w zakresach podawanych dla innej biomasy (Grzybek 2004, Kalembasa 2006). W tym zakresie spełnione są również wymagania odpowiednich standardów jakościowych dla peletów z biomasy zielnej i drzewnej zapisanych odpowiednio w normach PN-EN 17225-6:2014 i PN-EN 17225-2:2014.

Zawartość metali ciężkich w paliwie jest istotna z punktu widzenia ochrony środowiska, trwałości kotłów oraz możliwości wykorzystania odpadów paleniskowych, bowiem popioły można zagospodarować, rozprowadzając je na powierzchni gruntu, w celu nawożenia, ulepszenia lub rekultywacji gleby (Kabala i in. 2010). Według Hermanna i Harasimowicz-Hermann (2005) skład chemiczny popiołu pochodzącego z biomasy, zwłaszcza mała zawartość w nim metali ciężkich, nie jest przeciwwskazaniem do zagospodarowania go jako nawóz.

#### **4. Podsumowanie**

Na obciążenie środowiska gazowymi produktami spalania wyraźny wpływ ma technologia spalania i warunki spalania. W warunkach badań własnych zaobserwowano znacznie zróżnicowaną emisję CO, NO i SO<sub>2</sub>. Okresowe spalanie porcji peletów z biomasy roślinnej na ruszcie z zapłonem od dołu i podawaniem powietrza pod ruszt powoduje znaczną emisję CO do atmosfery w początkowej fazie spalania oraz w końcowej podczas dopalania pozostałości koksowej. Jedynie, głównie dla peletów z biomasy drzewnej, przez krótki czas spalania emisja CO była na poziomie akceptowalnym, określonym przez stosowne standardy. Wykorzystanie peletów w takich urządzeniach grzewczych sprawia, że spalanie odbywa się ze znacznie mniejszą efektywnością energetyczną i ekologiczną. Przy wykorzystaniu tego typu biopaliw, charakteryzujących się przeciętną temperaturą spalania mniejszą od 800°C, istotna jest również emisja NO do atmosfery, która poprzez zależność od zawartości azotu w paliwie mniej jest związana z taką konstrukcją paleniska. Wybór do spalania biopaliw o jak najmniejszej zawartości azotu powinien przyczynić się do zmniejszenia emisji NO, która staje się kolejnym kryterium dopuszczającym urządzenia grzewcze do obrotu. Wielu badaczy zwraca uwagę na możliwą emisję pyłów i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania biomasy. Stąd też celowym byłoby wykonanie takich analiz w odniesieniu do kotłów małej mocy górnego spalania i z automatycznym podawaniem paliwa, uwzględniając różnice pomiędzy rodzajami wykorzystanych do spalania surowców.

Stały produkt spalania w postaci popiołu ze słomy, ze względu na większą obecność potasu niż w drewnie, może powodować dodatkowo problemy z dystrybucją powietrza przez spieki tworzące się na ruszcie. Skutkuje to pogorszeniem spalania i większą emisją do atmosfery. Pomimo zróżnicowanego składu chemicznego analizowane popioły pod kątem obciążenia środowiska makro-, mikroelementami i metalami ciężkimi nie wykazują tendencji do przekroczenia wartości granicznych określonych odpowiednimi normami. Niewielka zawartość metali ciężkich w analizowanych peletach świadczy o jego ekologicznych właściwościach w aspekcie energetycznego wykorzystania, pod względem tego kryterium niestwarzając przeciwwskazań przy wprowadzeniu do środowiska jako nawozu.

*Praca powstała przy współudziale Laboratorium Badań Środowiskowych Centrum Studiów Inżynierskich Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Chełmie, które sfinansowano w ramach projektu "Laboratorium badań środowiskowych CSI PWSZ w Chemie", ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013.*

## Literatura

- Chao, C.Y.H., Kwong, P.C.W., Wang, J.H., Cheung, C.W., Kendall, G. (2008). Co-firing coal with rice husk and bamboo and the impact on particulate matters and associated PAHs emission, *Biores. Technol.*, 99, 83-93.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Prog. Energy Combust Sci.*, 30(2), 219-230.
- Graham, S., Ogunfayo, I., Hall, M.R., Snape, C., Quick, W., Weatherstone, S., Eastwick, C. (2016). Changes in mechanical properties of wood pellets during artificial degradation in a laboratory environment. *Fuel Processing Technology*, 148, 395-402.
- Grzybek, A. (2004). Biomasa jako źródło energii. W: *Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania* (red. A. Grzybek). Bytom, Wyd. WSEiA, 10-19.
- Hermann, J., Harasimowicz-Hermann, G. (2005). Przydatność popiołów ze spalania biomasy do stosowania w rolnictwie i rekultywacji gruntów. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych*, 506, 189-196.
- Heykiri-Acma, H. (2003). Combustion characteristic of different biomass materials, *Energy Convers. Mgmt*, 44, 155-162.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R., Miles, T.R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54, 17-46.
- Jewiarz, M., Kubica, K. (2012). Technologie spalania słomy. W: *Słoma - wykorzystanie w energetyce cieplnej* (red. A. Grzybek). Falenty, ITP.
- Juszczak, M. (2002). Ecological burning waste wood. Industrial research limit of carbon monoxide and nitrogen oxide. Poznań, Wyd. Pol. Poznańskiej.
- Juszczak, M. (2014). Concentration of carbon monoxide and nitrogen oxides from a 25 kW boiler supplied periodically. *Chem. Process Eng.*, 35(2), 163-172.
- Kabala, C., Karczewska, A., Kozak, M. (2010). Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Rolnictwo*, 96, 97-117.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1979). Pierwiastki śladowe w środowisku geologicznym. Warszawa, Wyd. Geologiczne.

- Kalembasa, D. (2006). Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, 7(4), 909-914.
- Koniecznyński, J., Komosiński, B., Cieślik, 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. (2008). Spalanie i paliwa. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Kowalczyk-Juśko, A. (2017). The Influence of the Ash from the Biomass on the Power Boiler Pollution. *J. Ecol. Eng.*, 18(6), 200-204.
- Kraszkiewicz, A., Kachel-Jakubowska, M., Niedziółka, I. (2017). The chemical composition of ash from the plant biomass in terms of indicators to assess slagging and pollution of surface heating equipment. *Fresenius Environ. Bull.*, 26(11), 6383-6389.
- Krzyżaniak, M., Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J. (2014). Thermophysical and chemical properties of biomass obtained from willow coppice cultivated in one- and three-year rotation cycles. *J. Elem.*, 1, 161-175.
- Kubica, K. (2007). Energetyczne wykorzystanie biomasy – uwarunkowania techniczno-technologiczne. *Biuletyn Ekologiczny*, 3(163), 3-7.
- Kubica, K., Kubica, R., Mokrosz, W., Szlęk, A. (2012). Założenia do standaryzacji parametrów jakościowych słomy i technologii spalania w kotłach rusztowych. W: *Słoma – wykorzystanie w energetyce cieplnej*. (red. Grzybek A.). Falenty, ITP.
- Kuboń, M., Kocira, S., Kocira, A., Leszczyńska, D. (2018). Use of Straw as Energy Source in View of Organic Matter Balance in Family Farms. K. Mudryk and S. Werle (eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation, Springer Proceedings in Energy*, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_53).
- Li, J., Paul, M.C., Younger, P. L., Watson, I., Hossain, M., Welch, S. (2015). Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model. *Applied Energy*, 156, 749-755.
- Liu, H., Chaney, J., Li, J., Sun, Ch. (2013). Control of NOx emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. *Fuel*, 103, 792-798.
- Molo, B. (2016). Polityka Unii Europejskiej a rozwój odnawialnych źródeł energii w Niemczech. *Rocznik Integracji Europejskiej*, 10, 121-142.
- Obernberger, I., Brunner, T., Bärthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. *Biomass Bioenergy*, 30, 973-982.
- Ociepa-Kubicka, A., Ociepa, E. (2012). Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 15(2), 169-180.

- 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.
- PN-EN 17225-2:2014 Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy. Pelety drzewne do zastosowań nieprzemysłowych.
- PN-EN 17225-6:2014 Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy. Pelety nie drzewne do zastosowań nieprzemysłowych.
- PN-EN 18125:2017 Biopaliwa stałe – Oznaczanie wartości opałowej.
- PN-EN 18134-3:2015 Biopaliwa stałe – Oznaczanie zawartości wilgoci – Metoda suszarkowa – Część 3: Wilgoć w próbce do analizy ogólnej.
- PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze – Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW – Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
- PN-EN 18122:2016 Biopaliwa stałe – Oznaczanie zawartości popiołu.
- Róg, L. (2011). Wpływ czynników, wynikających z jakości paliwa, na proces spalania w kotłach energetycznych. dostęp 27.04.2016 r.: <http://www.nettg.pl/news/19093/wplyw-czynnikow-wynikajacych-z-jakosci-paliwa-na-proces-spalania-w-kotlach-energetycznych>.
- Rybak, W. (2006). Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
- Shao, Y., Wang, J., Preto, F., Zhu, J., Xu, Ch. (2012). Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/Heat Generation. *Energies*, 5, 5171-5189.
- Szyszlak-Bargłowicz, J., Piekarski, W., i Krzaczek, P. (2006). Spalanie słomy jednym z kierunków jej wykorzystania. *Energetyka. Zeszyt tematyczny IX*, 53-57.
- Szyszlak-Bargłowicz, J., Zając, G., Słowik, T. (2017). Badanie emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych podczas spalania peletów z agro biomasy w kotle małej mocy. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 19, 715-730.
- Temmerman, M., Mignon, Ch., Pieret N. (2011). Influence of increasing shares of miscanthus on physical and mechanical properties of pellets produced in an industrial softwood pellets plant. In: *Proceedings of V International Scientific Symposium Farm machinery and process management in sustainable agriculture*. Lublin, Poland, 151-166.
- Van Loo, S., Koppejan, J. (2007). Handbook of biomass combustion and co-firing. *IEA Bioenergy Task*, 32, 266-272.
- Villeneuve, J., Palacios, J.H., Savoie, P., Godbout, S. (2012). A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3 MW). *Bioresour Technol.*, 111, 1-11.
- Wang, Z.J., Pei, D. (2011). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33, 325-332.

Zajac, G., Szyszlak-Barglowicz, J., Slowik, 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.

## **Burden for the Environment by the Products of Pellets from Plant Biomass Incineration in Low-Power Heating Devices**

### **Abstract**

Biomass combustion is treated as a neutral process for the environment through the prism of CO<sub>2</sub> emissions. However, under certain conditions, the burning of biofuels in individual heating systems can result in a serious local threat to the environment and human health.

Considering energetic features of biomass, research was undertaken to quantify selected gas products and solid combustion of wheat, rye, and sawdust straw pellets. In the group of gaseous products the emission of CO, NO and SO<sub>2</sub> was determined, whereas in the group of solid products (in ash) the value of selected macro- and microelements as well as heavy metals was determined.

In the test conditions, significantly differentiated emissions of CO, NO and SO<sub>2</sub> were observed. The combustion technology and combustion conditions have a significant effect on the CO and SO<sub>2</sub> load. Periodic combustion of a portion of plant biomass pellets on the grate with ignition from below and air supply under the grate causes a significant emission of CO to the atmosphere in the initial combustion phase and in the final coke residue after burning. Only, mainly for wood biomass pellets, CO emission for a short time was at an acceptable level, determined by appropriate standards. The use of pellets in such heating devices brings with it a small ecological effect and makes burning much less effective. Using this type of biofuels, characterized by average combustion temperature less than 800°C, also important is the emission of NO to the atmosphere, which through the dependence on the nitrogen content in the fuel is less related to the construction of the furnace. Choosing to burn biofuels with the lowest nitrogen content should contribute to the reduction of NO emissions, which becomes another criterion for allowing heating devices to be marketed. Many researchers point to the possible emission of dust and polycyclic aromatic hydrocarbons during biomass burning. Therefore, it would be advisable to carry out such analyzes with regard to low-power upper combustion boilers and with automatic fuel delivery, taking into account the differences between the types of raw materials used for combustion.

The solid combustion product in the form of straw ash, due to the greater presence of potassium than in wood, can cause additional problems with the distribution of air by the sinters forming on the grid. This results in reduced combustion and increased emissions to the atmosphere. Despite the varied chemical composition, the ashes analyzed in terms of the macro, micronutrient and heavy metals load do not tend to exceed the limits set by the relevant standards. The low content of heavy metals in the analyzed pellets shows its ecological properties in terms of its energy use, without causing contraindications when introducing solid combustion products to the environment as a fertilizer.

### Streszczenie

Spalanie biomasy, jest traktowane jako proces neutralny dla środowiska przez pryzmat emisji CO<sub>2</sub>. Jednak w pewnych warunkach spalanie biopaliw w indywidualnych systemach grzewczych, może powodować poważne zagrożenie w skali lokalnej dla środowiska i zdrowia ludzi.

Biorąc pod uwagę cechy energetyczne biomasy, podjęto badania, których celem było ilościowe określenie wybranych produktów gazowych i stałych spalania peletów ze słomy pszennej, żytniej i trocin sosnowych. W grupie produktów gazowych określono emisję CO, NO i SO<sub>2</sub>, natomiast w grupie produktów stałych (w popiele) określono zawartość wybranych makro- i mikroelementów oraz metali ciężkich.

W warunkach badań zaobserwowano znacznie zróżnicowaną emisję CO, NO i SO<sub>2</sub>. Na obciążenie środowiska CO i SO<sub>2</sub> wyraźny wpływ ma technologia spalania i warunki spalania. Okresowe spalanie porcji peletów z biomasy roślinnej na ruszcie z zapłonem od dołu i podawaniem powietrza pod ruszt powoduje znaczną emisję CO do atmosfery w początkowej fazie spalania oraz w końcowej podczas dopalania pozostałości koksowej. Jedynie, głównie dla peletów z biomasy drzewnej, przez krótki czas spalania emisja CO była na poziomie akceptowalnym, określonym przez stosowne standardy. Wykorzystanie peletów w takich urządzeniach grzewczych niesie ze sobą niewielki efekt ekologiczny oraz sprawia że spalanie odbywa się ze znacznie mniejszą efektywnością. Przy wykorzystaniu tego typu biopaliw, charakteryzujących się przeciętną temperaturą spalania mniejszą od 800°C, istotna jest również emisja NO do atmosfery, która poprzez zależność od zawartości azotu w paliwie mniej jest związana z konstrukcją paleniska. Wybór do spalania biopaliw o jak najmniejszej zawartości azotu powinien przyczynić się do zmniejszenia emisji NO, która staje się kolejnym kryterium dopuszczającym urządzenia grzewcze do obrotu. Wielu badaczy zwraca uwagę na możliwą emisję pyłów i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania biomasy. Stąd też celowym byłoby wykonanie takich analiz w odniesieniu do kotłów małej mocy górnego



spalania i z automatycznym podawaniem paliwa, uwzględniając różnice pomiędzy rodzajami wykorzystanych do spalania surowców.

Stały produkt spalania w postaci popiołu ze słomy, ze względu na większą obecność potasu niż w drewnie, może powodować dodatkowo problemy z dystrybucją powietrza przez spieki tworzące się na ruszcie. Skutkuje to pogorszeniem spalania i większą emisją do atmosfery. Pomimo zróżnicowanego składu chemicznego analizowane popioły pod kątem obciążenia środowiska makro, mikroelementami i metalami ciężkimi nie wykazują tendencji do przekroczenia wartości granicznych określonych odpowiednimi normami. Niewielka zawartość metali ciężkich w analizowanych peletach świadczy o jego ekologicznych właściwościach w aspekcie jego energetycznego wykorzystania, nie powodując przeciwności przy wprowadzeniu do środowiska stałych produktów spalania jako nawozu.

**Słowa kluczowe:**

spalanie biomasy, emisja, metale ciężkie

**Keywords:**

biomass combustion, emission, heavy metals