

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 34**  
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok XI**

**Warszawa–Opole 2018**

---

MAREK GAWLICKI\*

ELŻBIETA JAROSZ-KRZEMIŃSKA\*\*

JOANNA POLUSZYŃSKA\*\*\*

## Popioły ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych

**Słowa kluczowe:** biopaliwa, popioły lotne, biomasa, popioły roślinne, kotły fluidalne.

Uruchomienie w elektrowniach i elektrociepłowniach „zielonych bloków”, w kotłach których w złożu fluidalnym spalane są wyłącznie biopaliwa, spowodowało powstanie popiołów lotnych znacząco różniących się od pozostałych rodzajów ubocznych produktów spalania. Jako biopaliwa wykorzystywane są w Polsce głównie zrębki drzewne, ale mogą być również spalane różnego rodzaju pellety, oraz odpady z upraw i odpady z przetwarzania produktów rolnych, a także biomasa pozyskiwana z plantacji roślin energetycznych. W pracy omówiono skład chemiczny popiołów ze spalania wielu rodzaju roślin oraz porównano je ze składem chemicznym popiołów lotnych pobranych z instalacji przemysłowych zielonych bloków energetycznych.

### 1. Wprowadzenie

Gospodarcze wykorzystanie popiołów lotnych powstających w konwencjonalnych elektrowniach ciepłych i elektrociepłowniach ma w Polsce wieloletnią tradycję. Największe ilości popiołów lotnych znajdują zastosowanie w szeroko rozumianym budownictwie i przemyśle materiałów budowlanych, inżynierii lądowej, drogownictwie oraz górnictwie. Mogą być użyte również w rolnictwie, leśnictwie oraz do oczyszczania ścieków i stabilizacji chemicznej komunalnych osadów ściekowych [1–6]. Wykorzystanie popiołów lotnych traktowane jest często jako działania rutynowe. Realizatorzy takich prac nierzadko przenoszą doświadczenia zdobyte w zagospodarowaniu konwencjonalnych popiołów lotnych

---

\* Dr hab. inż., prof. ICiMB, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu, m.gawlicki@icimb.pl

\*\* Dr inż., Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, elzbietajarosz@geol.agh.edu.pl

\*\*\* Dr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu, j.poluszynska@icimb.pl

z węgla kamiennego i węgla brunatnego na przedsięwzięcia mające na celu racjonalne wykorzystanie również innych rodzajów popiołów. Nie sprzyja to optymalizacji kierunków użytkowania ubocznych produktów spalania w zależności od ich rodzaju i właściwości, a w określonych warunkach może stwarzać poważne zagrożenia, których trwale, negatywne skutki mogą być identyfikowane niekiedy nawet po upływie kilku lat [7].

Przez długi okres jedynym paliwem stałym używanym w energetyce zawodowej i przemysłowej pozostawał węgiel spalany w kotłach pyłowych, stąd też popioły lotne tradycyjnie były dzielone na krzemionkowe popioły lotne, utożsamiane z popiołami lotnymi z węgla kamiennego oraz wapienne popioły lotne, będące w większości ubocznymi produktami spalania węgla brunatnego. Wprowadzenie w energetyce na szeroką skalę w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku odsiarczania gazów odlotowych oraz rozwój kotłów, w których paliwa są spalane w złożu fluidalnym, zróżnicowały odpady elektrowniane i skomplikowały pierwotną klasyfikację popiołów lotnych, tworząc nowe kryteria rozróżniania ubocznych produktów spalania paliw stałych.

Z kolei dążenie do ograniczenia emisji dwutlenku węgla ze spalania nieodnawialnych paliw kopalnych spowodowało, że zintensyfikowane zostały działania mające na celu zastąpienie węgla paliwami odnawialnymi – biopaliwami, stanowiącymi tym cenniejsze źródło energii, iż powstający w wyniku ich spalania CO<sub>2</sub> nie jest traktowany jako składnik antropogenicznej emisji dwutlenku węgla. Początkowo węgiel i biopaliwa były spalane najczęściej łącznie, w tych samych kotłach, a powstające popioły lotne stanowiły mieszaninę obydwu rodzajów popiołów. Taki sposób pozyskiwania energii, zwłaszcza w konwencjonalnych kotłach pyłowych, stwarzał wiele problemów wynikających między innymi z intensyfikacji procesów korozji instalacji kotłowych [8]. Trudności te spowodowały znaczne ograniczenie współspalania paliw kopalnych i biopaliw na rzecz budowy, obok kotłów opalanych węglem, „zielonych bloków”, w kotłach których w złożu fluidalnym spalane są wyłącznie biopaliwa. Jednym ze skutków takiej decyzji jest pojawienie się kolejnej kategorii odpadów – popiołów lotnych ze spalania biopaliw, znacząco różniących się od pozostałych rodzajów ubocznych produktów spalania.

Jako biopaliwa w największych ilościach wykorzystywane są w Polsce odpady drzewne, głównie zrębki, ale też wióry, trociny, pył drzewny, kora i drewno odpadowe. Spalane są również różnego rodzaju pellety, w tym pellety ze słomy zbożowej żółtej i szarej, oraz organiczne odpady z szeregu rodzaju upraw i odpady z przetwarzania produktów rolnych, m.in.: łodygi roślin oleistych i strączkowych, łodygi i kolby kukurydzy, trzcina, odpady z roszarni lnu i z gorzelni, wytłoki z produkcji kawy zbożowej, łuski ziaren słonecznika, pestki, łupiny i inne pozostałości z przerobu owoców oraz warzyw, a także biomasa pozyski-

wana z plantacji roślin energetycznych (m.in. miskant, słonecznik bulwiasty, wierzba energetyczna, topola, eukaliptus, malwa pensylwańska) [9–10] oraz odpady mięsno-kostne. Spośród biopaliw importowanych okresowo do naszego kraju wymienić należy przede wszystkim pestki owoców palmy olejowej, określane zazwyczaj akronimem PKS (*Palm Kernel Shell*).

Duże zróżnicowanie popiołów lotnych ze spalania biomasy powoduje, że należy je traktować z wyjątkową ostrożnością, a każdorazowa decyzja o ich zastosowaniu powinna być poprzedzona analizą informacji o ich składzie chemicznym lub co najmniej rzetelną informacją o poszczególnych składnikach użytego biopaliwa.

W Polsce pracuje obecnie wiele bloków energetycznych zasilanych biopaliwami, w tym zielony blok w elektrowni w Połańcu (obecnie: Enea Elektrownia Połaniec SA) wyposażony w jeden z największych na świecie kocioł spalający wyłącznie biomasę o mocy 205 MW.

Celem artykułu jest omówienie składu chemicznego popiołów powstających z szeregu rodzaju roślin, które są lub mogą być wykorzystane jako paliwo w kotłach fluidalnych oraz prezentacja składu chemicznego popiołów lotnych pobranych z instalacji przemysłowych zielonych bloków energetycznych.

Przedstawione informacje są o tyle istotne, że uboczne produkty spalania powstające w elektrowniach i elektrociepłowniach są formalnie przyporządkowywane określonym grupom odpadów według reguł, które w niedostatecznym stopniu uwzględniają specyficzne cechy i różnice właściwości użytkowych poszczególnych rodzajów popiołów. W efekcie popioły ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych klasyfikowane są, zgodnie z Rozporządzeniem Ministerstwa Środowiska w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014, poz. 1923), do tej samej grupy odpadów, co uboczne produkty spalania paliw konwencjonalnych, tj. odpowiednio do grupy 10 01 01 – obejmującej „żużel, popioły paleniskowe i pyły z kotłów (z wyłączeniem pyłów z kotłów wymienionych w 10 01 04)” oraz do grupy 10 01 24 zawierającej „piaski ze złóż fluidalnych (z wyłączeniem 10 01 82)”.

Brak rozróżnienia pomiędzy poszczególnymi rodzajami popiołów lotnych, a tym samym źródłem spalanego paliwa pierwotnego, może być powodem niewłaściwych kierunków ich wykorzystania i zagospodarowania.

## 2. Popioły z odpadów drzewnych

Informacje o właściwościach i składzie chemicznym odpadów drzewnych wykorzystywanych jako biopaliwo w elektrowniach i elektrociepłowniach są zróżnicowane, jednak badacze są zgodni, że wartość opałowa suchej masy drzewnej, składającej się w polskich elektrowniach i elektrociepłowniach głównie ze zrębków drzewnych, zawiera się najczęściej w granicach 18,5–19,5 MJ/kg, zaś ilość popiołu powstającego w wyniku spalania takich odpadów drzewnych stanowi

zazwyczaj ok. 0,4–0,8% masy suchego paliwa. Większe udziały popiołu stwierdzono w przypadku spalania drewna topolowego i wierzbowego pochodzącego z plantacji roślin szybko rosnących, odpowiednio 1,9 i 2,0% oraz w przypadku kory z drzew iglastych – 3,9% masy suchego paliwa [9]. Skład chemiczny popiołów z biomasy drzewnej jest zróżnicowany i uzależniony nie tylko od gatunku spalane drewna, ale również od udziału w spalanej biomase drzewnej poszczególnych organów roślinnych przetwarzanego termicznie materiału (drewna strzały, kory drzewnej, karpiny, gałęzi) oraz od sposobu spalania paliwa [11]. Istotny jest również rodzaj gleby, na której wyrastały drzewa. Duża zgodność zaznacza się w opiniach na temat niewielkich, nieprzekraczających zwykle 0,05% zawartości w popiele drzewnym chloru oraz siarki ( $< 0,1\%$ ), a także dominacji węglanu wapnia wśród składników tworzących te popioły. Jako składniki główne popiołów drzewnych otrzymywanych w dostatecznie niskiej temperaturze wymieniane są również węglany potasu, magnezu i sodu oraz fosforany [12–14]. Tabela 1 zawiera przykłady zawartość wybranych tlenków głównych w popiołach z czterech rodzajów drewna (sosna, świerk, buk i dąb).

Tabela 1

Zawartość wybranych tlenków głównych w popiołach drzewnych [14]

Oznaczany tlenek	Zawartość tlenku w popiele [% m/m]			
	sosna	świerk	buk	dąb
CaO	38,9	14,9	20,1	50,9
MgO	10,6	3,9	14,6	5,9
Na <sub>2</sub> O	1,1	0,6	0,4	0,5
K <sub>2</sub> O	22,0	69,3	33,2	12,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,0	3,7	4,8	3,8

Ocena zawartości pierwiastków obecnych w śladowych ilościach w różnych składnikach biomasy drzewnej i w otrzymywanych z niej popiołach, a zwłaszcza zawartość metali ciężkich, były w minionych latach przedmiotem licznych badań, których wyniki udostępnione zostały między innymi w obszernej publikacji Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzyckiego [16]. Zawartości pierwiastków śladowych w popiołach drzewnych wahają się w relatywnie szerokich granicach. Podobnie jak zawartości pierwiastków głównych, przy zachowaniu określonych warunków spalania, uzależnione są nie tylko od gatunku i rodzaju organów roślinnych spalane drewna, ale również rodzaju gleby, na której wyrastały drzewa oraz ich wieku i środowiska. Przykłady wyników oznaczeń zawartości kilkunastu pierwiastków śladowych w popiołach z drewna brzoźowego i świerkowego podano w tabeli 2.

T a b e l a 2

*Zawartość pierwiastków śladowych w popiołach z drewna brzoźowego i świerkowego w oparciu o wyniki badań [17]*

Oznaczany pierwiastek	Zawartość pierwiastka w popiele z drewna brzoźowego [mg/kg]		Zawartość pierwiastka w popiele z drewna świerkowego [mg/kg]	
	mediana	max. – min.	mediana	max. – min.
As	10	52 – 2	12	44 – 2
B	652	1050 – 276	484	588 – 268
Ba	4560	20700 – 2060	6620	17800 – 1450
Cd	57	203 – 26	31	184 – 4
Cr	306	508 – 147	268	342 – 183
Cu	473	650 – 138	594	860 – 294
Hg	0,6	1,7 – 0,2	0,6	1,2 – 0,1
Mo	3,3	41 – 1,2	2,1	8 – 1,0
Ni	37	156 – 18	28	80 – 1,4
Pb	516	13700 – 37	67,5	1290 – 8
Sr	1420	3499 – 488	1590	3840 – 711
Ti	306	652 – 92	132	268 – 91
Zn	14600	43500 – 3910	5060	7910 – 2630

### 3. Popioły z odpadów rolnych

Spośród odpadów rolnych uzyskiwanych w umiarkowanej strefie klimatycznej do celów energetycznych najczęściej jest wykorzystywana słoma (pellety) różnego rodzajów zbóż oraz roślin oleistych. Wyjątek stanowi słoma z owsa, która ze względu na bardzo niską temperaturę topnienia popiołu nie powinna być wykorzystywana jako paliwo [18]. Wartość opałowa słomy uzależniona jest zarówno od jej pochodzenia, jak i zawilgocenia oraz od stopnia jej uwiędnięcia. Przykładowo, wartość opałowa żółtej słomy pszenicy zawiera się w granicach 13–15 MJ/kg, zaś słomy szarej – ok. 17 MJ/kg. Dla takich samych rodzajów słomy jęczmiennej, wartości te wynoszą odpowiednio: 12–14 MJ/kg i 16 MJ/kg. Oceny zawartości popiołu w odpadach rolnych różnią się w zależności od metody ich oznaczania, gdyż badane materiały zawierają znaczne ilości lotnych w stosunkowo niskiej temperaturze związków pierwiastków alkalicznych i chloru. Autorzy pracy [19] podają następujące zawartości popiołu w odniesieniu do suchej masy słomy: żyto – 4,8%, pszenica – 5,7%, pszenżyto – 6,0%, jęczmień – 4,8%, rzepak – 6,2% oraz łodygi kukurydzy – 6,7%. Z tych samych względów, w zależności od temperatury jaką osiąga badany materiał i szybkości ogrzewania, wystąpią znaczne różnice w składzie chemicznym popiołów z odpadów rolnych (tab. 3). W tabeli 6 przedstawiono wyniki analiz chemicznych popiołów ze spalania kilku rodzajów upraw rolnych, uzyskane przez zespoły badawcze różnych krajów.

Tabela 3

*Skład chemiczny popiołów ze słomy rzepakowej, pszenicznej i żytniej z upraw zlokalizowanych w Kotlinie Jeleniogórskiej [19]*

Oznaczany tlenek	Zawartość oznaczanego tlenku w popiele [% m/m]					
	powolne ogrzewanie [temp. < 900°C]			szybkie spalanie [temp. > 900°C]		
	pszenica	żyto	rzepak	pszenica	żyto	rzepak
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,48	7,84	9,35	15,52	16,38	18,71
SiO <sub>2</sub>	26,45	31,19	32,39	63,33	65,16	64,82
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,11	0,17	0,31	0,23	0,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,15	3,27	4,83	2,02	3,14	4,75
CaO	4,81	4,94	5,83	1,93	2,07	2,16
MgO	1,94	2,96	3,18	1,05	1,24	1,54
K <sub>2</sub> O	20,45	19,36	21,93	0,98	1,67	2,05
Na <sub>2</sub> O	14,83	15,12	13,95	0,17	0,25	0,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,15	1,63	2,85	0,08	0,03	0,05
Pozostałość	19,74	13,69	5,69	14,61	9,83	4,72

Tabela 4

*Przykłady wyników oznaczeń podstawowych składników popiołów z odpadów rolnych [20–23]*

Oznaczany tlenek	Zawartość oznaczanego tlenku w popiele [% m/m]						
	słoma pszeniczna [20]	słoma pszeniczna [21]	słoma pszeniczna [22]	słoma jęczmienna [22]	kolby kukurydzy [23]	łodygi kukurydzy [21]	łodygi słonecznika [21]
SiO <sub>2</sub>	65,70	5,00	31,82	21,15	79,24	37,00	26,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,73	1,15	1,02	2,27	0,98	2,37	2,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,58	0,95	2,27	3,50	0,64	1,19	1,19
CaO	7,84	25,44	9,53	10,02	8,97	13,00	17,00
MgO	2,68	4,63	b.d.	b.d.	1,46	7,35	6,65
SO <sub>3</sub>	2,34	6,98	1,50	2,47	b.d.	1,32	4,63
K <sub>2</sub> O	3,27	24,72	43,41	38,03	3,83	15,00	17,10
Na <sub>2</sub> O	2,45	1,28	0,42	4,12	315 ppm	0,25	0,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,67	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
TiO <sub>2</sub>	0,22	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Strata prażenia	7,32	28,97	b.d.	b.d.	10,84	22,50	23,53

b.d. – brak danych.

## 4. Popioły z odpadów z przeróbki owoców i warzyw

Odpady z przemysłowej przeróbki owoców i warzyw, podobnie jak odpady rolne, wykorzystywane są w polskich elektrowniach i elektrociepłowniach jako uzupełnienie biopaliw drzewnych. Dostarczane są przez wytwórców krajowych. Mogą być również importowane. Podstawowym celem ich spalania jest często nie tylko produkcja energii cieplnej, ale również pozbycie się uciążliwych odpadów organicznych podlegających procesom rozkładu. Ich skład chemiczny jest znacznie zróżnicowany. Charakteryzują się stosunkowo wysoką wartością opałową, która w przypadku odpadów PKS może przekraczać 20 MJ/kg suchej masy paliwa. Zawartość popiołu nie jest większa niż 2%. Przykłady składu chemicznego popiołów uzyskanych ze spalania kilku tego rodzaju odpadów przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Przykłady wyników oznaczeń podstawowych składników popiołów z odpadów z przeróbki owoców i warzyw [24–26]

Oznaczany tlenek	Zawartość oznaczanego tlenku w popiele [% m/m]				
	łupiny orzecha włoskiego [24]	łuski ziaren słonecznika [24]	pestki śliwy [24]	pestki wiśni [25]	łupiny owoców palmy olejowej PKS [26]
SiO <sub>2</sub>	23,29	23,46	3,59	b.d.	54,81
CaO	16,70	15,18	14,65	27,14	5,79
K <sub>2</sub> O	32,99	28,29	44,80	17,88	6,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,20	7,07	20,12	10,85	b.d.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,67	2,48	0,11	0,38	11,40
MgO	13,49	7,27	11,62	8,73	6,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50	4,23	0,68	22,34	0,36
SO <sub>3</sub>	2,20	4,03	2,47	b.d.	b.d.
Na <sub>2</sub> O	1,00	9,79	0,46	0,62	b.d.
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,15	0,02	b.d.	b.d.

b.d. – brak danych.

## 5. Popioły z upraw roślin energetycznych

Spośród roślin energetycznych, które mogą być uprawiane na dużą skalę, najczęściej wymieniane są: topola hybrydowa, wierzba energetyczna, wierzba wiciowa, wierzba ostrolistna, miskant olbrzymi, słonecznik bulwiasty, róża wielokwiatowa, ślazier pensylwański, rdest sachaliński i eukaliptus. Charakterystyczną cechą tych roślin są duże przyrosty masy w stosunkowo krótkim czasie oraz relatywnie wysoka wartość opałowa, zawierająca się w granicach 15–19 MJ/kg suchej masy paliwa. Zawartość popiołu z drewna wymienionych wyżej gatun-



ków drzew (wierzba, topola) nieznacznie przekracza 1% suchej masy. Najwięcej popiołu uzyskuje się ze spalania miskantu – ok. 7,0% i słonecznika bulwiastego – 5,4%. Przykładowe składy chemiczne popiołów z kilku roślin energetycznych podano w tabeli 6.

Tabela 6

*Przykłady wyników oznaczeń podstawowych składników popiołów ze spalania roślin energetycznych [27–28]*

Oznaczany tlenek	Zawartość oznaczanego tlenku w popiele [% m/m]			
	miskant [27]	topola [28]	wierzba [28]	eukaliptus [28]
SiO <sub>2</sub>	59,90	3,87	6,10	10,04
CaO	10,00	57,33	46,09	57,74
K <sub>2</sub> O	11,50	18,73	23,40	9,29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,61	0,85	13,01	2,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,49	0,68	1,96	3,10
MgO	b.d.	13,11	4,03	10,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	1,16	0,74	1,12
SO <sub>3</sub>	1,87	3,77	3,00	3,47
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,28	1,61	1,86
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,28	0,06	0,12
MnO	0,88	0,45	b.d.	1,09

b.d. – brak danych.

Autorzy [27] podali, że analizowany przez nich popiół z eukaliptusa zawierał również: 0,10% BaO, 0,06% SrO oraz 659 ppm Zn, 220 ppm B, 158 ppm Cu oraz 82 ppm Cr.

Omawiając biopaliwa, które mogą być wykorzystane w energetyce, należy wspomnieć również o odpowiednio przygotowanych (potencjalne zagrożenie sanitarne i odorotwórcze) oraz zabezpieczonych odpadach mięsno-kostnych (mączki). Problem energetycznego przetwarzania tego rodzaju odpadów zaznaczył się szczególnie w czasie epidemii BSE ([https://pl.wikipedia.org/wiki/J%C4%99zyk\\_angielski\\_Bovine\\_Spongiform\\_Encephalopathy](https://pl.wikipedia.org/wiki/J%C4%99zyk_angielski_Bovine_Spongiform_Encephalopathy)) oraz w wyniku zakazu używania mączek mięsno-kostnych jako paszy dla zwierząt.

Mączki mięsno-kostne są paliwem o wartości opałowej dochodzącej do 24 MJ/kg. Popiół stanowi ok. 18% masy paliwa [29]. Podstawowymi składnikami popiołu są: CaO – 41,82%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 40,94%, Na<sub>2</sub>O – 6,41%, SO<sub>3</sub> – 4,24%, K<sub>2</sub>O – 3,16%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,37%, MgO – 1,38% [28].

## 6. Popioły z biopaliw spalanych w kotłach fluidalnych

W kotłach fluidalnych polskich elektrowni zawodowych i elektrociepłowni, zasilanych wyłącznie biopaliwami, spalana jest najczęściej mieszanina biomasy – zrębki drzewne w ilości 78–80% wraz z 22–20% dodatkiem biomasy „agro” w postaci łusek nasion słonecznika lub pelletów ze słomy. W tabeli 7 przedstawiono przykłady wyników badań próbek popiołów lotnych uzyskanych z dwu różnych instalacji fluidalnego spalania 100% biomasy w Polsce. Skład chemiczny popiołów został określony metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF, natomiast zawartość metali ciężkich metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej ASA.

W instalacji 1 paliwo stanowiły zrębki drzewne w ilości 78% oraz mieszanina biomasy „agro”, na którą składały się pellety ze słomy oraz łuski słonecznika, łącznie 22% paliwa. W instalacji 2 spalane były zrębki drzewne w ilości 80% wraz z 20% dodatkiem łusek słonecznika.

Tabela 7

*Skład chemiczny popiołów lotnych ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych energetyki zawodowej*

Popiół lotny z instalacji 1		Popiół lotny z instalacji 2	
[% m/m]			
Strata prażenia	2,10	Strata prażenia	1,71
SiO <sub>2</sub>	50,10	SiO <sub>2</sub>	52,50
CaO	15,38	CaO	14,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,49	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,18
MgO	4,20	MgO	4,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,69	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,56
SO <sub>3</sub>	5,68	SO <sub>3</sub>	5,36
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,80	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,29
Na <sub>2</sub> O	0,60	Na <sub>2</sub> O	0,27
K <sub>2</sub> O	5,75	K <sub>2</sub> O	12,80
Cl <sup>-</sup>	1,54	Cl <sup>-</sup>	0,35
[mg/kg]			
V	22,6	V	12,6
Cr	39,0	Cr	14,1
Mn	2289	Mn	2197
Co	4,0	Co	3,2
Ni	25,4	Ni	14,8
Cu	78,8	Cu	33,4
Zn	295,5	Zn	164,9
As	6,1	As	11,6
Cd	9,7	Cd	3,7
Pb	67,9	Pb	15,9

Źródło: Badania własne.

Wyniki badań potwierdziły, że podstawowym składnikiem popiołów lotnych w obu instalacjach jest  $\text{SiO}_2$ , którego zawartość wynosi odpowiednio: 50,1 i 52,5%. Zawartości części pozostałych składników głównych w popiołach lotnych z obydwu instalacji wykazały znaczne różnice, wynoszące odpowiednio:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 2,18 i 10,49% oraz  $\text{K}_2\text{O}$ : 5,75 i 12,80%. Zdecydowanie wyższą zawartością chlorków oraz metali ciężkich charakteryzowały się popioły z instalacji 1, gdzie spalana była biomasa „agro” zawierająca obok łusek z ziaren słonecznika również dodatek pelletu ze słomy.

## 7. Podsumowanie

Popioły ze spalania biomasy w dużym stopniu decydują o składzie i przydatności popiołów lotnych z kotłów fluidalnych, w których są spalane biopaliwa. Informacje o składzie chemicznym popiołów ze spalania określonego rodzaju roślin stanowią ważny element w ocenie ich przydatności jako samodzielnego paliwa, a także jako składnika spalanego w mieszanie, łącznie z innymi biopaliwami lub paliwami kopalnymi. Są niezbędne przy dokonywaniu wstępnej oceny zagrożeń, jakimi dla instalacji kotłowych jest obecność w popiołach składników powodujących tworzenie się szkodliwych napieków. Pozwalają również na wskazanie lub eliminację potencjalnych kierunków zastosowań popiołów. Dane o składzie chemicznym popiołów zaczerpnięte z literatury należy traktować z dużą ostrożnością, gdyż skład chemiczny popiołów ze spalania roślin może się znacznie różnić nawet wtedy, gdy spalane są rośliny tego samego gatunku. Należy również zwrócić uwagę, że w wielu publikacjach wyniki analiz popiołów nie zawierają informacji o zawartości niektórych składników bardzo ważnych dla oceny właściwości użytkowych popiołów, np. zawartości chloru. Bardzo często informacje o spalonym materiale są zbyt ogólnikowe i niewystarczające dla požądanej identyfikacji popiołu, np. odpady drzewne.

Warunki w jakich biopaliwa spalane są w przemysłowych kotłach fluidalnych w znaczący sposób zmieniają skład chemiczny popiołów lotnych, powodując między innym duży wzrost w nich zawartości  $\text{SiO}_2$ , niemniej jednak o właściwościach użytkowych, a tym samym kierunkach zastosowania nadal decyduje skład chemiczny pierwotnych popiołów roślinnych.

Ponieważ zdecydowana większość popiołów z biopaliw oraz popiołów lotnych z kotłów fluidalnych, w których spalane są biopaliwa, zawiera zbyt duże ilości składników, które w cementach i betonach mogą występować tylko w ograniczonych ilościach (m.in.  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  i  $\text{Cl}^-$ ). Omawiane popioły należy więc uznać za nieprzydatne w tych obszarach działalności gospodarczej\*.

---

\* Praca wykonana w ramach projektu badawczego PBS3/A2/21/2015 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

## Literatura

- [1] G i e r g i c z n y Z., *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2013.
- [2] R a j c z y k K., *Popioły lotne z kotłów fluidalnych i możliwości ich uszlachetniania*, Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Opole 2012.
- [3] *Informator SPC. Przemysł cementowy w liczbach 2018*, Kraków 2018.
- [4] C u e n c a J., R o d r í g u e z J., M a r t í n - M o r a l e s M., S á n c h e z - R o l d á n Z., Z a m o r a n o M., *Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self compacting concrete*, „Construction and Building Materials” 2013, Vol. 40, s. 702–709.
- [5] C r u z N.C., R o d r i g u e s M.S., C a r v a l h o L., D u a r t e l A.C., P e r e i r a E., R ö m k e n s P.F.A.M., T a r e l h o L.A.C., *Ashes from fluidized bed combustion of residual forest biomass: recycling to soil as a viable management option*, „Environmental Science and Pollution Research” 2017, Vol. 24, s. 14770–14781.
- [6] P o l u s z y ń s k a J., *Możliwości zastosowania popiołów ze spalania biomasy w gospodarowaniu osadami ściekowymi*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2013, nr 13, s. 49–59.
- [7] G a w l i c k i M., M a ł o l e p s z y J., *Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie – zagrożenia*, [w:] *Awarie budowlane. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzyzdroje 21–24 maja 2013*, oprac. red. M. Kaszyńska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin 2013, s. 23–38.
- [8] N o w a k W., W e s o ł o w s k a M., *Uwarunkowania techniczne spalania biomasy w kotłach energetycznych*, [w:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*, red. P. Gołas, A. Kaliszewski, Wydawnictwo Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary 2013 s. 216–224.
- [9] W a n d r a s z J.W., W a n d r a s z A.J., *Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2006.
- [10] R y b a k W.: *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [11] K o w a l k o w s k i A., O l e j a r s k i J., *Możliwości wykorzystania popiołów z biomasy leśnej jako źródła elementów odżywczych*, [w:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*, red. P. Gołas, A. Kaliszewski, Wydawnictwo Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary 2013, s. 147–176.
- [12] S h a o Y., W a n g J., P r e t o F., Z h u J, X u C h., *Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation*, „Energies” 2012, No. 5, s. 5171–5189.
- [13] M i s r a M.K., R e g l a n d K.W., B a k e r A.J., *Wood ash composition as a function of furnace temperature*, „Biomass and Bioenergy” 1993, Vol. 4, No. 2, s. 103–116.
- [14] O b e r n b e r g e r J., B i e d e r m a n n F., W i d m a n n W., R i e d l R., *Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions*, „Biomass and Bioenergy” 1997, Vol. 12, No. 3, s. 211–224.
- [15] C i e s i e l c z u k T., K u s z a G., N e m ś A., *Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb*, „Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych” 2011, nr 49, s. 219–227.

- [16] U l i a s z – B o c h e ń c z y k A., M o k r z y c k i E., *The elemental composition of biomass ashes as a preliminary assessment of the recovery potential*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2018, t. 34, nr 4, s. 115–132.
- [17] R e i m a n n C., O t t e s e n T., A n d e r s s o n M., A r n o l d u s s e n A., K o l l e r F., E n g l m a i e r P., *Element levels in birch and spruce woods ashes – green energy?*, „Science of the Total Environment” 2008, Vol. 393, No. 2/3, s. 191–197.
- [18] O w c z u k M., K o ł o d z i e j c z y k K., *Ocena możliwości wykorzystania słomy i wytlóków z lnicznika siewnego jako alternatywnego surowca energetycznego*, „Chemik” 2011, R. 65, nr 6, s. 537–542.
- [19] K a r c z H., K a n t o r e k M., G r a b o w i c z M., W i e r z b i c k i K., *Możliwość wykorzystania słomy jako źródła paliwowego w kotłach energetycznych*, „Piece Przemysłowe & Kotły” 2013, nr 6, s.1–8.
- [20] Q u d o o s A., K i m H.G., R e h m a n A., R y o u J.-S., *Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of whea strow ash blended cement composites*, „Construction and Building Materials” 2018, Vol. 193, No. 12, s. 481–490.
- [21] A s o g a n O., B i n i c i H., O r t l e k E., *Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk wheat strow ad sunflower stalk ashes*, „Construction and Building Materials” 2016, Vol. 106, No. 3, s. 253–263.
- [22] C o b r e r o s C., R e y e s – A r k u z a J.L., *Barley strow ash pozzolanic activity and comparision with other natural artifical pozzolans from Mexico*, Pre-reviewed article. 2018, bioresources. com.
- [23] U d o e y o F.F., A b a l i o a k a r S.A., *Maize-cob ash as filler in concrete*, „Journal of Materials and Civil Engineering” 2003, No. 3/4, s. 205–208.
- [24] V a s s i l e v S.V., B a x t e r D., A n d e r s e n L.K., V a s s i l e v a C h.G., M o r g a n T.J., *An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass*, „Fuel” 2012, Vol. 94, s. 1–33.
- [25] D u r a n - V a l l e C.J., G o m e z - C o r z o M., P a s t o r - V i l l e g a s J., G o m e z - S e r r a n o G., *Study of cherry stones as raw material in reparation of carbonaceous adsorbents*, „Journal of Analytical and Applied Pyralysis” 2005, Vol. 73, No. 1, s. 59–67.
- [26] O l u t o g e F.A., Q u a d r i H.A., O l a f u s i O.S., *Investigation of the strenght propertis of palm kernel shell ash concrete*, „Engineering, Technology & Applied Science Research” 2012, Vol. 2, No. 5, s. 315–319.
- [27] L a n z e r s t o r f e r C h., *Chemical composition and properties of ashes from combustion plants using Miscanthus as fuel*, „Journal of Environmental Science” 2017, Vol. 54, No. 4, s. 178–183.
- [28] V a s s i l e v S.V., B a x t e r D., A n d e r s e n L.K., V a s s i l e v a C h.G., *An overview of the chemical composition of biomass*, „Fuel” 2010, Vol. 89, s. 913–933.
- [29] K a r c z H., K o z a k i e w i c z A., *Termiczna utylizacja odpadów zwierzęcych*, „Energetyka i Ekologia” 2005, nr 3, s. 173–181.

*MAREK GAWLICKI  
ELŻBIETA JAROSZ-KRZEMIŃSKA  
JOANNA POLUSZYŃSKA*

#### FLY ASH FROM FLUIDIZED-BED COMBUSTION OF 100% BIOMASS

**Keywords:** biofuel, fly ash, biomass, ash from plants, fluidized-bed combustion.

Biomass combustion in fluidized-bed boilers resulted in generation of an entirely new type of waste, which differs significantly from other types of combustion by-products. In Poland mainly wood chips are used as biofuel, but also various types of pellets, crop waste, processing waste of agricultural origin or biomass obtained from energy plantations. The paper discusses the chemical composition of ash from the combustion of several types of plants which were then compared with the chemical composition of fly ash derived from industrial installations so-called "green power units".