



ALICJA ULIASZ-BOCHEŃCZYK\*, ALEKSANDRA PAWLUK\*\*, JOANNA SIERKA\*\*

## Wymywalność zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy

### Wprowadzenie

Zwiększenie zainteresowania wykorzystaniem energii ze źródeł odnawialnych spowodowane jest rosnącym – wraz z rozwojem cywilizacyjnym – zapotrzebowaniem na energię.

Szczególą rolę wśród odnawialnych źródeł energii ma biomasa, która jest obecnie coraz szerzej stosowana w energetyce zawodowej (Raport GUS 2014). Najczęściej stosowanym paliwem stałym z biomasy jest biomasa leśna, ale znaczenia nabierają także paliwa z biomasy rolniczej (Fijałkowska i Styszko 2011).

Zużycie biomasy wzrasta zarówno w elektrowniach i elektrociepłowniach stosujących węgiel kamienny jak i brunatny (Emitor 2013). W 2005 roku w elektrowniach i elektrociepłowniach stosujących węgiel brunatny zużycie biomasy wyniosło 660 962 GJ, a w 2013 r. wzrosło do 3 751 612. Z kolei w 2005 roku w elektrowniach i elektrociepłowniach stosujących węgiel kamienny zużycie biomasy wyniosło 9 317 763 GJ, a w 2013 r. – 42 917 011 GJ (Emitor 2013). W zakładach energetyki zawodowej, stosujących jako paliwo podstawowe węgiel kamienny, pozyskanie energii z biomasy było dużo większe niż w tych stosujących węgiel brunatny. W elektrowniach i elektrociepłowniach na biomasę w 2013 r. zużycie tego paliwa wyniosło 26 275 970 GJ (Emitor 2013).

---

\* Dr hab. inż., prof. AGH, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków;  
e-mail: aub@agh.edu.pl

\*\* Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Tak jak podczas spalania węgla kamiennego i brunatnego, tak i podczas spalania biomasy powstają stałe odpady, głównie w postaci popiołów lotnych. Ilość oraz jakość tego typu odpadów zależy przede wszystkim od rodzaju użytej biomasy (Rajamma i in. 2009; Kosior-Kazberuk 2011). Przez odpowiedni dobór biomasy, uwzględniając jej właściwości i skład chemiczny, dla danego typu kotła, można wpłynąć na właściwości popiołów tworzących się podczas spalania (Ściążko i in. 2006), co może decydować o ich ewentualnym wykorzystaniu gospodarczym.

Problemem, w przypadku wykorzystania popiołów ze spalania biomasy, może być wysoka wymywalność niektórych zanieczyszczeń (Vassilev i in. 2013a, b).

W artykule przedstawiono wyniki badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołu lotnego ze spalania biomasy i jego zawiesin wodnych w porównaniu do popiołów ze spalania węgla w kotle konwencjonalnym i fluidalnym.

## 1. Odpady energetyczne ze spalania biomasy

Powstające obecnie w wyniku spalania biomasy odpady energetyczne zaliczane są według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014, poz. 1923) do grupy 10 – odpady z procesów termicznych; podgrupy – 10 01 – odpady z elektrowni i innych zakładów energetycznych spalania paliw (z wyłączeniem grupy 19) i są to dwa rodzaje odpadów ze spalania i współspalania: popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce (10 01 03) oraz popioły paleniskowe oraz popioły lotne ze współspalania inne niż wymienione w 10 01 16 (10 01 17) (Emitor 2013; Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki 2015).

Oprócz nich katalog wyróżnia jeszcze trzy rodzaje odpadów ze współspalania biomasy:

- ◆ 10 01 14 – popioły paleniskowe, żużle i pyły z kotłów ze współspalania zawierające substancje niebezpieczne,
- ◆ 10 01 15 – popioły paleniskowe, żużle i pyły z kotłów ze współspalania inne niż wymienione w 10 01 14,
- ◆ 10 01 16 – popioły lotne ze współspalania zawierające substancje niebezpieczne.

Większość minerałów i faz stwierdzonych w popiołach ze spalania biomasy występuje w popiołach ze spalania węgla, takich jak: krzemiany, tlenki i wodorotlenki, siarczany, fosforany, węglany, chlorki, azotany, krzemionka, kalcyt, anhydryt, peryklaz, hematyt (Vassilev 2013a, b; Jaworek i in. 2013; Giron i in. 2013; Nortey Yeboah i in. 2014). W popiołach lotnych ze spalania biomasy stwierdzono znaczący udział chloru i siarki (Jaworek i in. 2013).

Wykonany przez Vassilev'a i in. (201a, b) przegląd literatury pokazuje, że wymywanie pierwiastków z popiołów ze spalania biomasy można uszeregować w następujący sposób: Cl > S > K > Na > Sr > Ni > Mn > Cd > Kr > Zn > Co > Si > Mo > – Li > (Mg, Pb) > Ca >> Cu > Ba > P > Se > Sb > Al > Fe > (Br, Hg) > (W, B, Sn, Ti, V), a wysoka wymywalność związana jest z występowaniem w tego typu popiołach łatwo rozpuszczalnych chlorków (sylwit, halit), siarczanów (syngenit, ettringit, gips), tlenków (CaO), wodorotlenków

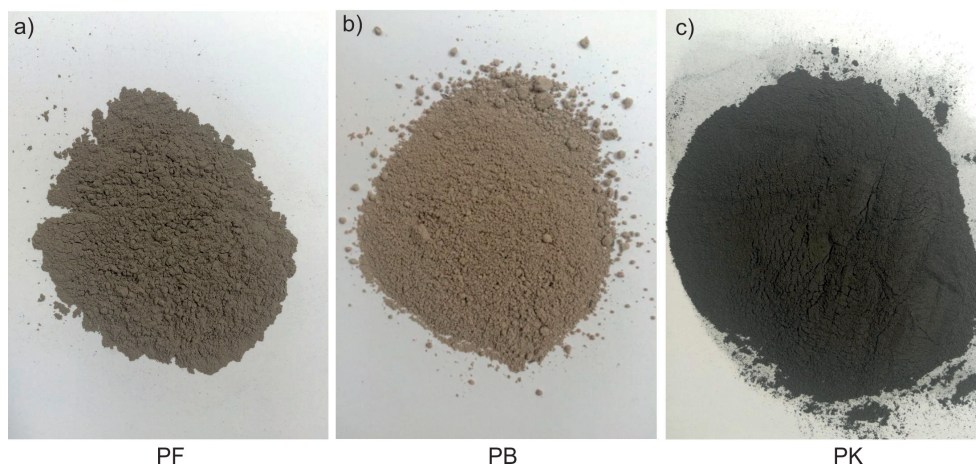
(portlandyt), azotanów, węglanów i wodorowęglanów. Wysoka wymywalność zanieczyszczeń, takich jak: Ba, Cl, Cr, Mo, Pb może stanowić problem środowiskowy (Vassilev i in. 2013a, b). Może to również ograniczyć możliwość gospodarczego wykorzystania popiołów ze spalania biomasy w górnictwie, które jest największym odbiorcą popiołów lotnych w Polsce (Emitor 2013).

## 2. Materiały wykorzystane do badań

Badania przeprowadzono na trzech rodzajach popiołów (rys. 1):

- ◆ ze spalania węgla kamiennego w kotle konwencjonalnym (10 01 02) PK – rysunek 1c,
- ◆ z kotłów fluidalnych ze spalania węgla kamiennego (10 01 82) PF – rysunek 1a,
- ◆ ze spalania biomasy (10 01 03) PB – rysunek 1b

o składach chemicznych przedstawionych w tabeli 1 i parametrach fizycznych przedstawionych w tabeli 2.



Rys. 1. Próbkki badanych popiołów

Fig. 1. Samples of tested ash

Popioły lotne ze spalania biomasy, w porównaniu z popiołami ze spalania węgla kamiennego, charakteryzują się wysoką zawartością CaO, SO<sub>3</sub> i Cl. Zawartość SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jest w tych popiołach niższa od tych ze spalania węgla. Uzyskane wyniki potwierdzają badania innych autorów (Girón i in. 2013; Hinojosa i in. 2014; Nortey Yeboah i in. 2014; Rajamma i in. 2009) (tab. 1).

Według normy BN-79/6732.09 analizowane popioły ze spalania węgla w kotłach zarówno fluidalnych jak i konwencjonalnych można zaliczyć do popiołów krzemionkowych. Popioły ze spalania biomasy nie mieszczą się w klasyfikacji niniejszej normy.

Straty prażenia popiołów ze spalania biomasy są wyższe od tych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych i niższe od tych charakteryzujących popioły z kotłów konwencjonalnych (tab. 1).

Popioły ze spalania biomasy charakteryzują się najwyższą gęstością, najwyższym stopniem porowatości oraz największą powierzchnią właściwą spośród badanych odpadów (tab. 2).

Tabela 1. Skład chemiczny popiołów zastosowanych do badań [%]

Table 1. Chemical composition of ash used for researches [%]

Składnik	Rodzaj popiołu		
	10 01 02	10 01 82	10 01 03
Na <sub>2</sub> O	0,7705	0,9035	0,4858
K <sub>2</sub> O	1,1738	1,5850	31,0593
CaO	4,0988	4,2503	14,4716
MgO	2,9060	3,0280	5,2879
SO <sub>3</sub>	0,6356	0,7559	17,9606
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,8938	11,2743	1,5357
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1752	5,6252	1,9666
SiO <sub>2</sub>	42,5000	51,2000	16,8000
Cl	b.d.	b.d.	1,19248
Straty prażenia	1,69	0,11	0,27

Tabela 2. Parametry fizyczne badanych popiołów lotnych

Table 2. Physical parameters of the tested fly ash

Rodzaj popiołu	Wilgotność [%]	Gęstość właściwa [kg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość nasypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Stopień porowatości [%]	Powierzchnia właściwa [cm <sup>2</sup> /g]
PK	1,032	1,98	0,4818	75,67	5 757,39
PB	0,969	2,83	0,4511	84,06	8 474,66
PF	0,433	2,26	0,4467	80,23	5 172,92

### 3. Wyniki badań – wymywalność zanieczyszczeń

Badania przeprowadzono według zaleceń zawartych w normie – PN-G-11011 Górnictwo – Materiały do podsadzki zestalanej i doszczelniania zrobów – Wymagania i badania. Wyniki badań zestawiono w tabelach 3 i 4. Badania wymywalności porównano z dopuszczalnymi wielkościami wymywalności zawartymi w normach – PN-G-11011.

Tabela 3. Wymywalność zanieczyszczeń z suchych popiołów oraz suchych mieszanin popiołowych  
 Table 3. The leachability of contaminants from dry ashes and dry ash mixtures

Wymywalność	PK	PB	PF	75% PB + 25% PK	50% PB + 50% PK	25% PB + 75% PK	75% PB + 25% PF	50% PB + 50% PF	75% PB + 25% PF
pH	12,22	12,92	11,92	12,47	12,38	12,39	12,75	12,85	12,7
Jony [mg/dm <sup>3</sup> ]									
Na	14,41	146,60	32,62	163,60	109,50	59,21	154,90	116,70	59,53
K	6,46	19 080,00	28,21	15 690,00	10 150,00	5 708,00	13 690,00	9 632,00	5 763,00
Zn	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Cu	0,0001	0,0070	0,0011	0,0052	0,0076	0,0041	0,0190	0,0160	0,0003
Ni	0,00108	0,00160	0,00200	0,00190	0,00150	0,00130	0,00280	0,00290	0,00083
Pb	0,0051	0,0001	0,0029	0,0001	0,0005	0,0001	0,0050	0,0172	0,0002
Hg	0,0034	0,0086	0,0015	0,0087	0,0066	0,0028	0,0065	0,0025	0,0022
Cd	0,00018	0,00070	0,00057	0,00077	0,00061	0,00038	0,00130	0,00093	0,00033
Cr	0,00300	2,850	0,017	1,599	0,685	0,348	1,097	0,828	0,750
As	0,0090	0,0420	0,0055	0,0320	0,0310	0,0130	0,0210	0,0140	0,0080
Cl	37,6	3 829,0	109,2	3 107,0	2 018,0	1 589,0	2 992,0	2 032,0	1 306,0
SO <sub>4</sub>	107,90	16 980,00	670,80	14 150,00	9 273,00	4 735,00	10 050,00	7 410,00	3 512,00

Tabela 4. Wymywalność zanieczyszczeń z zawiesin wodnych popiołów oraz zawiesin wodnych mieszanin popiołowych  
 Table 4. The leachability of contaminants from the aqueous suspensions of ash and the aqueous suspensions of ash mixtures

Wymywalność	PK	PB	PF	75% PB+ 25% PK	50% PB + 50% PK	25% PB+ 75% PK	75% PB + 25% PF	50% PB+ 50% PF	75% PB + 25% PF
pH	9,47	10,23	8,62	10,13	11,18	8,89	9,52	9,11	9,36
Jony [mg/dm <sup>3</sup> ]									
Na	35,58	217,00	58,48	182,60	84,49	54,70	128,50	108,90	194,60
K	24,10	15 480,00	51,94	14 530,00	6 225,00	3 387,00	8 593,00	7 703,00	6 433,00
Zn	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Cu	0,0016	0,0001	0,0018	0,0009	0,0002	0,0001	0,0012	0,0010	0,0011
Ni	0,00010	0,00051	0,00180	0,00083	0,00036	0,00041	0,00080	0,00076	0,00135
Pb	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Hg	0,0011	0,0007	0,0030	0,0011	0,0021	0,0011	0,0009	0,0009	0,0016
Cd	0,00024	0,00023	0,00072	0,00028	0,00017	0,00023	0,00048	0,00027	0,00051
Cr	0,03800	1,587	0,028	1,372	1,334	0,752	0,926	0,565	0,334
As	0,0048	0,0025	0,0064	0,0028	0,0032	0,0033	0,0051	0,0043	0,0042
Cl	62,4	3 556,0	114,0	2 918,0	1 312,0	741,0	1 834,0	1 626,0	1 697,0
SO <sub>4</sub>	386,30	13 680,00	1 159,00	13 690,00	5 664,00	3 125,00	6 785,00	6 476,00	2 689,00

Badania wymywalności przeprowadzono dla następujących zestawów próbek popiołów suchych oraz zawiesin wodnych:

- ◆ 100% PK,
- ◆ 100% PK,
- ◆ 100% PF,
- ◆ 75% PB + 25% PK,
- ◆ 50% PB + 50% PK,
- ◆ 25% PB + 75% PK,
- ◆ 75% PB + 25% PF,
- ◆ 50% PB + 50% PF
- ◆ 25% PB + 75% PF.

Zawiesiny wykonano przy stosunku popiołu do wody wynoszącym 0,7.

Analizowane próbki wszystkich trzech popiołów charakteryzowały się porównywalnym pH w zakresie od 11,92 do 12,85.

Przeprowadzone badania wykazały bardzo wysoką wymywalność jonów potasu z popiołów ze spalania biomasy (10 01 03) (19 080 mg/dm<sup>3</sup>) w porównaniu z popiołami ze spalania węgla kamiennego (10 01 02) (6,46 mg/dm<sup>3</sup>) oraz ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych (10 01 82) (28,21 mg/dm<sup>3</sup>). Popioły te charakteryzowały się również znaczącą wymywalnością chromu 1,587 mg/dm<sup>3</sup>, w porównaniu z popiołami ze spalania węgla, które charakteryzowały się odpowiednio wymywalnością 0,003 i 0,017 mg/dm<sup>3</sup> (tab. 3).

Wysoka wymywalność zanieczyszczeń związana jest ze składem chemicznym i fazowym badanych popiołów. Obecność chloru i SO<sub>3</sub> w popiołach, w formach najprawdopodobniej łatwo rozpuszczalnych, skutkuje wysokim stężeniem tych jonów w odciekach.

Wymywalność chlorków (3829,0 mg/dm<sup>3</sup>) również jest o rzędy wielkości wyższa od tych stwierdzonych dla popiołów ze spalania węgla (odpowiednio: 37,6 i 109,2 mg/dm<sup>3</sup>) (tab. 3).

Zanieczyszczeniem, którego wysoka wymywalność zwraca również uwagę w prezentowanych wynikach są siarczany, których wartość dla popiołów z biomasy wynosi 16 980 mg/dm<sup>3</sup>. Wysoka wymywalność siarczanów, chloru i potasu potwierdza wyniki badań otrzymane przez innych autorów (Jaworek i in. 2013; Vassilev 2013a, b). Uzyskane wartości wymywalności dla popiołów ze spalania biomasy znacznie przekraczały wymagania zawarte w tabeli 5.

Wykonanie suchych mieszanek z popiołami PK oraz PF pozwoliło na obniżenie wymywalności potasu, chromu siarczanów i chlorków proporcjonalnie do zawartości popiołów z biomasy, jednak na poziomie nie spełniającym wymagań normowych (tab. 5).

Zawiesiny wodne popiołów ze spalania biomasy – pomimo obniżenia wymywalności w porównaniu z suchymi popiołami – wykazywały znaczne wymywalności tych samych problematycznych w tym przypadku – jonów potasu, chromu, siarczanów i chlorków (tab. 4). Przekraczając tym samym znacznie wymagania normy PN-G-11011.

Zawiesiny wodne mieszanek z popiołami PK oraz PF również charakteryzowały się niższą wymywalnością problematycznych jonów w stosunku do zawiesiny wodnej popio-

Tabela 5. Dopuszczalne wielkości wymywalności zawarte w normie – PN-G-11011

Table 5. Permissible leachability values according to the PN-G-11011 standard

Rodzaj zanieczyszczeń chemicznych	Dopuszczalne wielkości wymywalności zawarte w normie – PN-G-11011
Pierwiastki [mg/dm <sup>3</sup> ]	
♦ Cynk (Zn)	2,0
♦ Miedź (Cu)	0,5
♦ Ołów (Pb)	0,5
♦ Nikiel (Ni)	–
♦ Arsen (As)	0,2
♦ Rtęć (Hg)	0,02
♦ Kadm (Cd)	0,1
♦ Chrom (Cr)	0,5
Chlorki (Cl <sup>-</sup> ) [mg/dm <sup>3</sup> ]	1 000,0
Siarczany (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [mg/dm <sup>3</sup> ]	500,0
pH	6,0–12,0

Tabela 6. Właściwości świeżych zawiesin popiołowo-wodnych

Table 6. The properties of fresh ash-water suspensions

Zawiesina	Rozlewność [mm]	Gęstość zawiesiny [g/cm <sup>3</sup> ]	Ilość wody nadosadowej [%]	Czas wiązania [doba]	
				początek	koniec
PB	180	1,31	11,85	12	16
PK	210	1,22	9,30	3	7
PF	200	1,28	3,22	5	11
75% PB + 25% PK	180	1,3	8,43	12	16
50% PB + 50% PK	180	1,29	8,55	11	16
25% PB + 75% PK	210	1,25	8,78	5	9
75% PB + 25% PF	200	1,32	2,01	12	17
50% PB + 50% PF	200	1,31	1,00	10	17
25% PB + 75% PF	190	1,28	0,00	6,5	13



łów PB, jednak na poziomie przekraczającym wymagania zawarte w tabeli 6, z wyjątkiem mieszaniny o składzie: 25% PB + 75% PF, której wymywalność chromu i chlorków spełnia normę górnictwa. Problematyczna pozostaje jednak wysoka zawartość siarczanów. Uzyskane obniżenie wymywalności było najprawdopodobniej spowodowane utworzeniem uwodnionych krzemianów wapniowych oraz ettryngitu (Deja 2002).

Wykonane dla określenia wymywalności zanieczyszczeń zawiesiny wodne popiołów poddano również oznaczeniu podstawowych właściwości, takich jak: rozlewność, gęstość, ilość wody nadosadowej i czas wiązania (tab. 6).

Pomiar rozlewności wykonano według normy PN-85/G-02320 – Wiertnictwo. Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych, przy wykorzystaniu stożka typu AzNII.

Oznaczenie czasu wiązania zostało przeprowadzone według PN-EN 196-3:1996 – Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości, aparatem Vicata.

Ilość wody nadosadowej została oznaczona według normy PN-G-11011 – Materiały do podsadzki zestawionej i doszczelniania zrobów.

Najniższą (180 mm) rozlewność stwierdzono dla zawiesin wodnych popiołów ze spalania biomasy i mieszanin o składach: 75% PB + 25% PK i 50% PB + 50% PK, a najwyższą charakteryzowała się zawiesina wodna popiołu ze spalania węgla w kotle fluidalnym (PF) oraz zawiesiny mieszanin: 25% PB + 75% PK. Dla zawiesin wodnych popiołów ze spalania biomasy stwierdzono najdłuższy czas wiązania, tak jak dla tych sporządzonych z maksymalną zawartością tych odpadów. Również odstój zawiesin popiołów ze spalania biomasy był najwyższy. Analizowane zawiesiny charakteryzowały się porównywalną gęstością w granicach od 1,22 do 1,32 g/cm<sup>3</sup>.

## Podsumowanie

Przedstawione wyniki są badaniami wstępnymi, w programie mającym na celu ograniczenie wymywalności zanieczyszczeń z popiołów ze spalania biomasy.

Analizowane popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych, w kotłach konwencjonalnych oraz biomasy różnią się znacząco ilościowo składem chemicznym. Na szczególną uwagę w popiołach ze spalania biomasy zwraca obecność chloru, której nie stwierdzono w popiołach ze spalania węgla oraz wysoka zawartość SO<sub>3</sub>. Popioły te charakteryzują się podobnymi właściwościami fizycznymi.

Badane popioły charakteryzowały się wysoką wymywalnością jonów siarczanowych, chlorków, potasu i chromu, w ilościach znacznie przewyższających wartości uzyskane dla popiołów ze spalania węgla w kotłach konwencjonalnych i fluidalnych.

Wysoka wymywalność zanieczyszczeń z popiołów ze spalania biomasy, związana przede wszystkim z rodzajem paliwa, może być w najprostszy sposób ograniczona przez zmieszanie ich z popiołami ze spalania węgla z kotłów konwencjonalnych i kotłów fluidalnych. Również sporządzenie wodnych zawiesin popiołów pozwala na obniżenie wymywal-

ności. Jednak pomimo redukcji, wartości wymywalności znacznie przekraczają wymagania normy PN-G-11011 Materiały do podsadzki zestalanej i doszczelniania zrobów zawałowych. Wymagania i badania.

*Artykuł opracowano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.100.482.*

## LITERATURA

- Deja 2002. Immobilization of Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> in alkali-activated slag binders. *Cement and Concrete Research* 32, s. 1971–1979.
- Emitor 2013. *Emisja zanieczyszczeń środowiska w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych*. Agencja Rynku Energii, Warszawa.
- Fijałkowska, D. i Styszko, L. 2011. Ciepło spalania biomasy wierzbowej. *Rocznik Ochrona Środowiska* 13, s. 875–890.
- Girón i in. 2013 – Girón, R.P., Ruiz, B., Fuente, E., Gil, R.R. i Suárez-Ruiz, I. 2013. Properties of fly ash from forest biomass combustion. *Fuel* 114, s. 71–77.
- Hinojosa i in. 2014 – Hinojosa, M., Galvín, A., Agrela, F., Perianes, M. i Barbudo, A. 2014. Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: Conflictive chemical parameters according to technical regulations. *Fuel* 128, s. 248–259.
- Jaworek i in. 2013 – Jaworek, A., Czech, T., Sobczyk, A.T. i Krupa, A. 2013. Properties of biomass vs. coal fly ashes deposited in electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics* 71, s. 165–175.
- Kosior-Kazberuk, M. 2011. *Nowe dodatki mineralne do betonu, Budownictwo i inżynieria środowiska*. s. 2081–3279.
- Nortey Yeboah i in. 2014 – Nortey Yeboah, N.N., Shearer, Ch.R., Burns, S.E. i Kurtis, Kimberly, E. 2014. Characterization of biomass and high carbon content coal ash for productive reuse applications. *Fuel* 116, s. 438–447.
- Rajamma i in. 2009 – Rajamma, R., Ball, R., Tarelho, L., Allen, G., Labrincha, J. i Ferreira, V. 2009. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials* 172, s. 1049–1060.
- Raport GUS 2014. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 r.* Główny Urząd Statystyczny. Warszawa, 72 s.
- Ściążko i in. 2006 – Ściążko, M., Zuwała, J. i Pronobis, M. 2006. Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. *Energetyka* 3, s. 207–220.
- Uliasz-Bocheńczyk, A. i Mokrzycki, E., 2015. Biomasa jako paliwo w energetyce. *Rocznik Ochrona Środowiska* 17, s. 900–913.
- Vassilev 2013a – Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L. i Vassileva, C. 2013a. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel* 105, s. 40–76.
- Vassilev 2013b – Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L. i Vassileva, C. 2013b. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, s. 19–39.

**WYMYWALNOŚĆ ZANIECZYSZCZEŃ Z POPIOŁÓW LOTNYCH ZE SPALANIA BIOMASY**

## Słowa kluczowe

odpady energetyczne, popioły ze spalania biomasy, wymywalność zanieczyszczeń

## Streszczenie

Biomasa stanowi obecnie jedno z podstawowych źródeł energii odnawialnej w energetyce zawodowej w Polsce. Wykorzystanie tego paliwa wynika z obowiązującej Polityki Energetycznej Polski do 2030, która narzuca wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii co najmniej do poziomu 15% w 2020 roku, a następnie dalszy wzrost w latach następnych. Projekt Polityki energetycznej Polski do 2050 roku zakłada zwiększenie do 20% udziału energii odnawialnej we wszystkich źródłach zużywanej energii. Biomasa może być stosowana jako samodzielne paliwo lub może być współspalana z węglem. Każde paliwo stałe, również biomasa, w energetyce zawodowej powoduje powstawanie odpadów energetycznych. W przypadku każdego odpadu powinna być zachowana hierarchia sposobów postępowania z nimi zdefiniowana w Ustawie o odpadach. Odpady energetyczne są szeroko wykorzystywane w górnictwie, produkcji materiałów budowlanych i drogownictwie. Również dla ubocznych produktów spalania biomasy są to kierunki, które powinny być rozpatrywane w pierwszej kolejności ze względu na długoletnie doświadczenia w ich wykorzystaniu. Przykładowo, popioły lotne ze współspalania są dopuszczone przez normę PN-EN 450:1 – Popiół lotny do betonu. Popioły lotne ze spalania biomasy różnią się, pomimo wielu podobieństw, od popiołów ze spalania węgla czy współspalania. Popioły te mogą charakteryzować się wysoką wymywalnością zanieczyszczeń i przez to ich gospodarze wykorzystanie może być ograniczone. W artykule przedstawiono wyniki badań wymywalności zanieczyszczeń z suchych popiołów lotnych i ich wodnych zawiesin. Dla porównania wykonano oznaczenie wymywalności zanieczyszczeń z popiołów ze spalania węgla w kotłach konwencjonalnych i kotłach fluidalnych. Badane popioły ze spalania biomasy charakteryzowały się wysoką wymywalnością siarczanów, chlorków, chromu i potasu. Ponieważ górnictwo podziemne pozostaje jednym z podstawowych kierunków wykorzystania popiołów lotnych, uzyskane wyniki badań porównano z wymaganiami normy PN-G-11011 – Materiały do podsadzki zastalanej i doszczelniania zrobów zawałowych. Wymagania i badania.

**LEACHING OF POLLUTANTS FROM FLY ASH FROM THE COMBUSTION OF BIOMASS**

## Keywords

energetic waste, ash from the biomass combustion, leachability of contaminants

## Abstract

The biomass is currently one of the main renewable energy sources in the Polish power industry. The use of this fuel results from the current Polish Energy Policy until 2030, which imposes an incre-

ase in the share of renewables in final energy consumption to a minimum of 15% by 2020 and a further increase in the subsequent years. The Polish Energy Policy until 2050 assumes that share of renewables in all energy sources will increase to 20%. The biomass can be used as a standalone fuel or can be co-fired with coal. However, as with any solid fuel, the use of biomass in the power industry also generates waste. As with any waste, specific rules on waste management should be defined in the Act on Waste. Energetic waste is widely used in mining, building materials and road construction. Given the long experience in their use, the use of biomass combustion by-products should also be considered. This takes place in the case of fly ashes from co-combustion, which are, for example, compliant with the PN-EN 450: 1 standard “Fly ash for concrete”. Fly ash from biomass combustion is different, despite many similarities, from the ashes resulting from coal combustion and co-combustion. The ashes can be characterized by a high leachability of contaminants and thus their economic use may be restricted. The paper presents results of research on the leachability of contaminants from dry fly ashes and their aqueous suspensions. For purposes of comparison, the leachability of contaminants from ashes resulting from the combustion of coal in both conventional and fluidized bed boilers has been determined. The tested ashes from biomass combustion were characterized by a high leachability of sulphates, chlorides, chromium and potassium. Since underground mining remains one of the main directions of the use of fly ash, the obtained results were compared with the PN-G-11011 standard “The materials for solidifying backfill and gob grouting; Requirements and testing, Requirements and testing”.