



Grzegorz Markowski

Uniwersytet Opolski

GOSPODARCZE WYKORZYSTANIE POPIOŁÓW PO SPALENIU WĘGLA KAMIENNEGO I BIOMASY

Streszczenie. Coraz większa ilość powstających popiołów wymusza konieczność ich ponownego wykorzystania aby uniknąć ich składowania. Użycie popiołów wymaga poznanie ich składu fizyko-chemicznego na który wpływ ma rodzaj spalanej paliwa. Na możliwości zagospodarowania popiołów duży wpływ ma sposób ich odzysku i unieszkodliwiania. Popioły są wykorzystywane w górnictwie, rolnictwie, budownictwie czy też gospodarce odpadami. Drogownictwo wydaje się przyszłościowym obszarem ze względu na dużą ilość inwestycji w tym obszarze. Duże efekty ekonomiczne uzyskuje się z tytułu odzysku popiołów i tworzenia surowców lub produktów na ich bazie. W tym przypadku szczególne znaczenie mają prowadzone badania nad opracowaniem i wdrożeniem nowych kierunków ich odzysku oraz realizowanie nieodzownych inwestycji. Zagospodarowanie popiołów posiada przed sobą przyszłość poprzez ponowne wykorzystanie. Potencjał ten powinien być wykorzystany z uwzględnieniem zasady zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: popiół, biomasa, węgiel kamienny, gospodarka, zrównoważony rozwój

ECONOMIC USE OF ASHES AFTER THE COMBUSTION OF HARD COAL AND BIOMASS

Summary. The increasing amount of ashes generated necessitates their re-use to avoid storage. The use of ashes requires learning their physical and chemical composition, which is influenced by the type of fuel burned. The ability to manage ashes is strongly influenced by the way they are recovered and disposed of. Ashes are used in mining, agriculture, construction or waste management. Road engineering seems to be a future area due to the large amount of investments in this area. Large economic effects are obtained due to recovery of ashes and creation of raw materials or products based thereon. In this case, research on the development and implementation of new directions for their recovery and the implementation of indispensable investments are of particular importance. Ash management has a future ahead of us through re-use. The potential should be used taking into account the principle of sustainable development.

Keywords: ash, biomass, hard coal, economy, sustainable development

Wstęp

Coraz większa ilość popiołów przy ograniczeniach ich składowania powoduje powstanie nowych możliwości oraz kierunków ich ponownego wykorzystania. Podczas ich zagospodarowania należy uwzględnić zasady zrównoważonego rozwoju aby były uwzględnione interesy wszystkich stron. Wiąże się to również z faktem dużej zmienności właściwości

popiołów, zależnej od wielu czynników, które mogą utrudnić ich wykorzystanie. Głównym celem jest więc wskazanie jak najwięcej możliwości z poszanowaniem wszystkich stron.

Charakterystyka popiołów i biomasy

Nie istnieje jednoznaczna definicja pojęcia – popiół. Nie ma też spójnego systemu klasyfikacji popiołów, a istniejące systemy często odnoszą się jedynie do wąskiego zakresu zastosowania tych odpadów. Wejście w życie ustawy o odpadach¹ spowodowało wprowadzenie nowej klasyfikacji odpadów, zwyczajowo określonych mianem popiołów lotnych, opartej na katalogu odpadów z rozporządzenia Ministra Środowiska². Według normy PN-EN 450-1:2012³ popiół lotny to drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przed wszystkim SiO₂ i Al₂O₃, przy czym zawartość reaktywnego SiO₂ wynosi co najmniej 25% masy⁴. Decydujący wpływ na skład chemiczny popiołów ma pochodzenie spalanego paliwa, technologia jego spalania, a także miejsce pobrania próbek. Istnieje podział popiołów na: krzemianowe, glinowe i wapniowe, zależnie od wzajemnej proporcji SiO₂, Al₂O₃ i CaO. Podział ten odzwierciedla ich cechy: skład mineralny, właściwości mechaniczne, kształt i powierzchnię właściwą ziaren⁵. Ponieważ właściwości popiołu zależą zarówno od samego procesu spalania jak i typu użytego paliwa, są one bardzo zróżnicowane. Efektywne zagospodarowanie i ponowne wykorzystanie wymaga znajomości popiołów, a właściwie ich właściwości fizycznych i chemicznych⁶.

Biomasa jest to ulegająca biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (w tym substancje roślinne i zwierzęce), leśnictwa i związanych z nimi dziedzin przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego⁷. Liczba rodzajów biomasy jest nieograniczona i ma szerokie zastosowanie. Podstawowe jej rodzaje, takie jak odpady rolnicze i drewno są niedrogie i ogólnodostępne. Użycie biomasy jako nowego paliwa wymaga przeprowadzenia badań i analiz⁸. W energetyce stosowane są dwa rodzaje biomasy: leśna i pochodzenia rolniczego.

¹ Ustawa dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach.

² Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów.

³ PN-EN 450-1:2012 - *Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.

⁴ Szponder D. *Badanie wybranych właściwości popiołów lotnych z zastosowaniem analizy obrazu*, Kraków 2012.

⁵ Strzałkowska E., *Charakterystyka właściwości fizykochemicznych i mineralogicznych wybranych ubocznych produktów spalania węgla*, Gliwice 2011.

⁶ Bieniek J., Ściubidło A., Majchrzak – Kucęba I., *Properties of fly ash derived from coal combustion in air and in oxygen enriched atmosphere in a pilot plant installation Oxy-Fuel CFB 0,1 MW*, *Energetyka* 2013, nr 11, s. 821–826.

⁷ Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii.

⁸ Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S., *A review on biomass as a fuel for boilers*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, nr 15, s. 2262-2289.

Biomasa pochodzenia rolnego charakteryzuje się lepszymi parametrami fizyko – chemicznymi w porównaniu do biomasy leśnej (wyższa wartość opałowa, niższa zawartość wilgoci) a także znacznie poprawia proces jej spalania⁹.

Charakterystyka właściwości fizyko – chemicznych popiołów po spaleniu węgla i biomasy – opis wyników

Przeprowadzono badania próbek popiołu po spaleniu węgla kamiennego i biomasy. Do badań wykorzystano:

- próbka 1 – popiół ze współspalania węgla kamiennego z biomasą w kotle pyłowym;
- próbka 2 – popiół ze spalania biomasy w kotle fluidalnym z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym;
- próbka 3 – popiół ze spalania biomasy w kotle fluidalnym z naturalną cyrkulacją;
- próbka 4 – popiół ze spalania biomasy w kotle fluidalnym ze złożem bąbelkowym.

Paliwo stosowane w kotłach z których pochodzą próbki 1 i 2 to biomasa leśna. W przypadku próbek 3 i 4 to produkty uboczne spalania biomasy leśnej (80%) i biomasy pochodzenia rolniczego (20%). Analizowane popioły charakteryzowały się bardzo różnymi składami chemicznymi w zakresie ilościowym. W popiołach ze współspalania biomasy (próbka 1) przeważał w składzie SiO_2 . Popioły ze spalania biomasy zawierały w swoim składzie wysoką zawartość CaO , SO_3 oraz K_2O , co jest charakterystyczne dla tego typu odpadów. Popioły ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych (próbka 3 i 4) charakteryzują się wyższą zawartością K_2O , MgO , CaO i SO_3 oraz niższą Al_2O_3 w porównaniu do popiołów z węgla. Najbardziej znaczące różnice widać w niższej zawartości K_2O , SO_3 , CaO , Cl w stosunku do próbki 1.

Tabela 1. Skład chemiczny (tlenkowy) badanych popiołów.

Składnik	Symbol próbki badanego popiołu			
	1	2	3	4
[%]				
SiO_2	52,80	32,40	28,90	34,10
Al_2O_3	22,80	6,21	2,17	4,56
Fe_2O_3	6,25	2,53	1,84	2,90
CaO	5,17	8,62	23,05	21,13
MgO	2,85	3,42	6,82	5,64
Cl	0,00	0,45	1,82	1,19
SO_3	0,40	3,10	7,10	10,00
Na_2O_3	1,20	0,50	0,40	0,60
K_2O	3,10	3,70	18,10	13,70
Straty prażenia	4,60	4,30	4,50	6,70

Źródło: Uliasz – Bocheńczyk A., Pawluk A., Pyzalski M., Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych, Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, Volume 32, Pages 149-162, 2016.

⁹ Szymanowicz R., *Właściwości fizykochemiczne paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych*, Energetyka 2012, nr 5, s. 230-235.

Tabela 2. Skład chemiczny (pierwiastkowy) badanych popiołów.

Symbol [%]	Symbol próbki badanego popiołu			
	1	2	3	4
P	0,140	0,560	0,520	0,630
Ti	0,370	0,100	0,250	0,160
V	0,050	-	-	0,050
Cr	0,040	0,020	0,020	0,030
Mn	0,080	0,760	0,230	0,560
Co	0,030	-	-	-
Ni	0,020	0,010	-	0,010
Cu	0,010	0,010	0,020	0,020
Zn	0,010	0,040	0,040	0,130
Zr	0,020	0,020	0,010	0,012
Pb	0,007	0,004	0,004	0,060
Bi	0,003	0,002	0,003	-

Źródło: Uliasz – Bocheńczyk A., Pawluk A., Pyzalski M., Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, Volume 32, Pages 149-162, 2016.

Tabela 3. Wymywalność zanieczyszczeń oraz pH.

Rodzaj zanieczyszczenia [mg/dm ³]/pH	Symbol próbki badanego popiołu			
	1	2	3	4
Chlorki	150,300000	445,600000	1 449,000000	658,300000
Siarczany	790,500000	1 436,900000	5 745,800000	4 779,700000
K	223,000000	604,000000	9 446,000000	3 161,000000
Na	26,000000	25,000000	83,000000	67,000000
As	0,012210	-	0,002196	-
Cd	0,000451	0,000336	0,000057	0,000073
Cu	0,044160	0,447000	0,164200	0,201300
Cr	0,001548	0,001158	0,001634	0,001420
Hg	0,001000	0,000141	0,000374	0,000040
Pb	0,002758	0,009927	0,004876	0,340000
pH	11,96	12,25	12,79	12,46

Źródło: Uliasz – Bocheńczyk A., Pawluk A., Pyzalski M., Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, Volume 32, Pages 149-162, 2016.

Charakterystyczna dla popiołów ze spalania i współspalania biomasy jest obecność w ich składzie znacznych ilości K i P. Popioły te mogą zawierać więcej składników, takich jak: Ag, Au, B, Be, Ca, Cd, Cl, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Rb, Se, Zn w porównaniu do popiołów ze spalania węgla. Wysoka zawartość siarczanów i chlorków w badanych popio-

łach z próbek 2, 3 i 4 jest charakterystyczna dla odpadów powstałych po spalaniu biomasy leśnej.

Popioły ze spalania z biomasy charakteryzują się znaczącą wymywalnością: Ca, Mg, K, Na, siarczanów i chlorków. Na wysoką wymywalność siarczanów z popiołów z próbek 2, 3 i 4 oprócz biomasy ma również wpływ rodzaj kotła, w którym proces spalania jest zintegrowany z odsiarczaniem. Porównując wyniki wymywalności popiołów fluidalnych ze spalania biomasy z oznaczeniami dla popiołów z węgla kamiennego można zauważyć wyższą wymywalność: Na, K, Cu, Pb, SO₄ oraz niższą: Hg, Cd, Cr, As. Popioły ze spalania węgla charakteryzowały się porównywalnym, ale niższym pH.

Przedstawione wyniki badań pokazują, że popioły ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych różnią się w zakresie ilościowym składu chemicznego, składu fazowego oraz wymywalności od popiołów fluidalnych ze spalania węgla oraz współspalania biomasy w kotłach konwencjonalnych. Analizowane popioły charakteryzują się wyższą zawartością: K₂O, MgO, CaO i SO₃ oraz niższą SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O₃ w porównaniu do popiołów fluidalnych ze spalania węgla oraz współspalania biomasy w kotłach konwencjonalnych.

Charakterystyka właściwości fizyko–chemicznych popiołów po spalaniu węgla i biomasy – dyskusja wyników

Ważnym zagadnieniem dotyczącym charakterystyki popiołów są ich właściwości chemiczne. Tlenki żelaza o właściwościach ferromagnetycznych są składnikami wielu popiołów przemysłowych. Ich obecność jest łatwa do wykrycia dzięki pomiarom podatności magnetycznej¹⁰. Podatność magnetyczna może być stosowana jako główny czynnik do przewidywania zakresu przestrzennej emisji zanieczyszczeń metalami ciężkimi. Źródłami emisji zanieczyszczeń zawierających cząstki magnetyczne mogą być: zakłady metalurgiczne, spalanie paliw stałych, przemysł cementowy i ceramiczny, składowanie odpadów i transport lądowy¹¹. Skład chemiczny popiołu ze spalania węgla zależy w dużym stopniu od cech geologicznych i geograficznych złoża i warunków spalania. Skład chemiczny powstałego popiołu określają substancje mineralne i składniki organiczne zawarte w węglu¹². W węglu i w odpadach powstałych z jego spalania występują mikroelementy. Udział mikroelementów w odpadach paleniskowych ma wpływ na organizmy żywe (zarówno dodatni, jak i ujemny). Na szczególną uwagę zasługują: pierwiastki promieniotwórcze, pier-

¹⁰ Magiera T., Jabłońska M., Strzyszczyński Z., Bzowska G., *Technogeniczne cząstki magnetyczne w pyłach atmosferycznych jako nośnik metali ciężkich*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2009, nr 59, s. 115-126.

¹¹ Furst C., Lorz C., Zirlwagen D., Makeschin F., *Testing the Indicative Value of Magnetic Susceptibility Measurements for Concluding on Site Potentials and Risks Provoked by Fly Ash Deposition*, Environmental Management 2010, nr 46, s. 894–907.

¹² Mishra P. D., Das S. K., *A study of physico – chemical and mineralogical properties of Talcher coal fly ash for stowing on underground coal mines*, Materials Characterization 2010, nr 61, s. 1252–1259.

wiastki szkodliwe i korzystne dla zdrowia człowieka, czy pierwiastki łatwo rozpuszczalne w wodzie¹³.

W przypadku popiołu z biomasy dominują związki krzemu i glinu. Glin pochodził głównie z minerałów ilastych. Natomiast krzem tworzył głównie formy kwarcu. W popiele z biomasy leśnej występuje duża zawartość CaO i SO₃, tworząc CaSO₄. Zmieniają się one wraz ze wzrostem temperatury spopielenia¹⁴. W biomacie leśnej dominują: kwarc, hematyt i anhydryt. Natomiast w biomacie pochodzenia rolniczego: kwarc, selenit (gips)¹⁵. Z mineralogicznego punktu widzenia, popioły składają się głównie z kwarcu. W celu otrzymania lepszej jakości pod kątem właściwości chemicznych popiołów stosuje się procesy cyklonowania i flotacji. Ta obróbka spowodowała usuwanie chlorków, siarczanów i chromu¹⁶.

Gospodarcze wykorzystanie popiołów

Na zagospodarowanie popiołów duży wpływ ma sposób ich odzysku i unieszkodliwiania. W większości elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni zleca się ich zagospodarowanie specjalistycznym firmom. Najwyższe efekty ekonomiczne uzyskuje się z tytułu odzysku popiołów i tworzenia surowców/produktów na ich bazie¹⁷.

Budownictwo

Popioły są wykorzystywane na szeroką skalę w przemyśle materiałów budowlanych. Są wykorzystywane głównie do produkcji cementu. Zaletą popiołów są ich zdolności do wiązania ze związkami wapniowymi. Te cechy czynią ją wartościowym składnikiem cementów, równoważnym kruszywom mineralnym. Popioły stosowane są jako dodatki aktywne, które zmieniają cechy użytkowe spoiwa prowadząc do powstania cementu pucolanowego, ponadto wpływają na zwiększenie masy cementu i poprawę jego mrozoodporności, a także są wykorzystywane jako surowiec do produkcji klinkieru cementu portlandzkiego. Zastosowanie popiołów jako surowca pozwala obniżyć temperaturę spiekania niekiedy nawet o 200-300°C, a tym samym zmniejszyć zużycie paliwa technologicznego nawet o 30%. W zależności od zawartości poszczególnych tlenków we wsadzie, popioły mogą być stosowane jako dodatek krzemionośny, żelazonośny lub glinonośny. Popioły są materiałem stosowanym do produkcji betonów w postaci mieszanek i elementów prefabrykowanych.

¹³ Żygadło M., Woźnik M., *Obserwacje zmian właściwości popiołów powęglowych w procesach wietrzeniowych*, Energetyka 2009, nr 11, s. 771–775.

¹⁴ Xiao R., Chen X., Wang F., Yu G., *The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature*, Renewable Energy 2011, nr 36, s. 244–249.

¹⁵ Teixeira P., Lopes H., Gulynurtlu I., Lapa N., Abelha P., *Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co – firing with coal in a fluidized bed*, Biomass and Bioenergy 2012, nr 39, s. 192–203.

¹⁶ Doudart de la Gree G. C. H., Florea M. V. A., Keulen A., Brouwers H. J. H., *Contaminated biomass fly ashes – Characterization and treatment optimization for reuse as building materials*, Waste Management 2016.

¹⁷ Hycnar J., *Ekonomiczne aspekty gospodarki ubocznymi produktami spalania węgla (ups)*, Energetyka 2013, nr 5, s. 399–402.

Powoduje to obniżenie zapotrzebowania na wodę i poprawia urabialność mieszanki. W produkcji betonów komórkowych popioły spełniają rolę kruszywa i częściowo spoiwa. Uzyskuje się wyroby o dobrych właściwościach technicznych przy zmniejszonych kosztach produkcji¹⁸.

Elektrownie starają się o jak największe wykorzystanie popiołów, najczęściej w sferze budowlanej. Popioły traktowane są jako produkt uboczny, toteż nie we wszystkich elektrowniach może być im poświęcana tak wysoka uwaga jak produktowi głównemu (energii i ciepłu)¹⁹.

Gospodarka odpadami

Kierunki wykorzystania popiołów w gospodarce odpadami to: podnoszenie obwałowań składowisk, budowa wałów działowych pomiędzy kwaterami składowiska, organizacja placów składowych, odzysk mikrosfer. Coraz większa ilość dobrej jakości popiołów i wyczerpywanie się pojemności istniejących składowisk zachęca do ich wykorzystania. Zagospodarowanie popiołów przynosi korzyści ekonomiczne i pozytywne efekty ekologiczne²⁰.

Ceramika

Popioły wykorzystuje się do produkcji ceramiki budowlanej (cegły pełne, kratówki, dziurawki oraz pustaki szczelinowe), ceramiki wypalanej, wyrobów klinkierowych, ceramiki kanalizacyjnej oraz sanitarnej. Materiały te produkowane mogą być z surowców zawierających duże ilości popiołów (nawet do 80%). Mogą być wykorzystywane jako dodatek schudzający lub surowiec podstawowy. W pierwszym przypadku dodatek popiołu powoduje zmianę właściwości reologicznych wsadu, zmniejszenie jego plastyczności i wrażliwości na suszenie. Stosowanie popiołów jako surowca podstawowego prowadzone jest w technologii produkcyjnej zastępując naturalny surowiec ilasty²¹.

Górnictwo

Popioły znalazły również zastosowanie w górnictwie podziemnym, jako składnik materiałów do wypełniania podziemnych wyrobisk górniczych głębinowych. Przyczyniając się tym samym do zmniejszenia ilości piasku kwarcowego używanego do celów podsadzkowych. Popioły stosowane są do: likwidacji i wypełniania starych zrobów, zrobów czynnych ścian i zbędnych wyrobisk korytarzowych, wykonywania tam przeciwwybuchowych

¹⁸ Szponder D., *Badanie wybranych właściwości popiołów lotnych z zastosowaniem analizy obrazu*, Kraków 2012.

¹⁹ Szklorzova H., Pavlitova – Letkova Z., Jancova J., Holesinsky R., *Problematyka produkcji i wykorzystania ubocznych produktów spalania węgla w Republice Czeskiej*, Popioły z energetyki 2009.

²⁰ Hycnar J., Szczygielski T., Jarema–Suchorowska S., *Składowiska popiołów ze spalania węgla źródłem surowców mineralnych*, Popioły z energetyki 2010.

²¹ Szponder D., *Badanie wybranych właściwości popiołów lotnych z zastosowaniem analizy obrazu*, Kraków 2012.

i hamowania wybuchów, likwidacji zagrożenia pożarowego, wydzielania pól metanowych celem odzysku metanu, przeciwdziałania ucieczkom powietrza przez zroby²².

Drogownictwo

Popioły krzemianowo – glinowe znalazły zastosowanie w technologii utwardzania (stabilizacji) gruntów, zwałowisk i nasypów. Dzięki znacznej zawartości wapna nadają się do produkcji spoiw drogowych, pozwalających na stabilizację gruntów i obniżenie kosztów spoiwa przy uzyskiwaniu takich samych parametrów stabilizacji, jakie są uzyskiwane przy zastosowaniu czystego wapna lub cementu. Popioły krzemianowe są stosowane jako zamiennik cementu przy stabilizacji podbudowy dróg o małych natężeniu ruchu. Podobnie do budowy korpusu wałów przeciwpowodziowych stosuje się mieszankę popiołu z niewielką ilością cementu, która poprawia właściwości wytrzymałościowe²³.

Produkcja tworzyw sztucznych

W przemyśle tworzyw sztucznych popioły są stosowane jako napełniacze, obniżając koszty produkcji i poprawiając właściwości mechaniczne zmniejszając palność lub powodując zmianę gęstości tworzywa. Proces napełniania popiołami tworzyw prowadzony jest w taki sposób, że zachowują one charakterystyczne cechy wyjściowego tworzywa lub je poprawiają i w założonym zakresie mogą spełniać powierzone mu funkcje²⁴.

Rolnictwo

Wprowadzenie popiołu do gleby przyczynia się do: poprawy migracji wody w glebie, zmniejszenia wymywalności nawozów i drobnych frakcji gleby wskutek ich uszczelnienia, neutralizacji kwaśnego odczynu gleby. Można też wykorzystać popiół do nawożenia plantacji roślin ekologicznych²⁵. Powrót popiołu wytworzonego ze spalania biomasy do gleby jest najbardziej ekologicznym i zgodnym ze zrównoważonym rozwojem sposobem ich utylizacji. Znaczna część makro- i mikroelementów pobranych z gleby przez rośliny powraca do siedliska zamykając obieg składników mineralnych. Dawka popiołów sprzyja polepszeniu plonowania roślin. Wprowadzenie ich do gleby poprawia właściwości chemiczne gleby. Wysoko alkaliczny odczyn popiołów umożliwia odkwaszenie gleb. Ponadto popioły przyczyniają się do zwiększenia koncentracji fosforu i potasu w roślinie oraz wpływają na obniżenie zawartości azotu w roślinach²⁶.

²² Tenże.

²³ Tenże, s. 8.

²⁴ Tenże, s. 8.

²⁵ Myszkowska A., Świdarska – Ostapiak M., Szczygielski T., *Ocena i wytyczne wykorzystania popiołów ze współspalania w budownictwie i rolnictwa*, Bełchatów 2011.

²⁶ Wacławowicz R., *Rolnicze wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy*, Bełchatów 2011.

Podsumowanie

W popiele ze spalania węgla i ze spalania węgla wraz z biomasą największe jest stężenie tlenku żelaza, tlenku glinu, i krzemu. W przypadku popiołu z biomasy leśnej największe jest stężenie tlenku wapnia i krzemu, a z biomasy pochodzenia rolniczego potasu i wapnia. Spalanie węgla z biomasą wpływa na zmniejszenie stężenia zawartości metali ciężkich w popiele. Współspalanie węgla z biomasą zmienia stężenie pierwiastków śladowych w popiele oraz stężenie metali ciężkich i występuje też w nim ograniczona mobilność toksycznych pierwiastków.

Istnieją coraz większe możliwości zagospodarowania popiołów. Ich wykorzystanie może spowodować pozytywne aspekty ekonomiczne, gospodarcze, środowiskowe ale też i społeczne. Wykorzystanie popiołów w rolnictwie i gospodarce odpadami może wywołać pozytywny skutek nie tylko środowiskowy ale też i ekonomiczny. Ważne jednak aby przed ich wykorzystaniem przeprowadzić badania, które spowodują potwierdzenie skuteczności i bezpieczeństwa ich wykorzystania. Zastosowanie popiołów w budownictwie, ceramice i przy produkcji tworzyw sztucznych sprawi wymierne oszczędności w kosztach zakupu materiałów. Również w drogownictwie i górnictwie wykorzystanie ich jako materiału podstawowego wywoła skutki ekonomiczne. Każde wykorzystanie popiołów spowoduje, iż mniejsza ilość odpadów będzie składowana. Wykorzystanie odpadów sprawi, że lepiej zadamy o środowisko, które jest dobrem całego społeczeństwa. Można zaobserwować, iż gospodarcze wykorzystanie popiołów musi być nierozzerwalnie połączone z analizą pod kątem zrównoważonego rozwoju.

Bibliografia

- Bieniek J., Ściubidło A., Majchrzak – Kucęba I., *Properties of fly ash derived from coal combustion in air and in oxygen enriched atmosphere in a pilot plant instalation Oxy-Fuel CFB 0,1 MW*, Energetyka 2013.
- Doudart de la Gree G. C. H., Florea M. V. A., Keulen A., Brouwers H. J. H., *Contaminated biomass fly ashes – Characterization and treatment optimization for reuse as building materials*, Waste Management 2016.
- Furst C., Lorz C., Zirlewagen D., Makeschin F., *Testing the Indicative Value of Magnetic Susceptibility Measurements for Concluding on Site Potentials and Risks Provoked by Fly Ash Deposition*, Environmental Management 2010.
- Hycnar J., *Ekonomiczne aspekty gospodarki ubocznymi produktami spalania węgla* (ups), Energetyka 2013.
- Hycnar J., Szczygielski T., Jarema – Suchorowska S., *Składowiska popiołów ze spalania węgla źródłem surowców mineralnych*, Popioły z energetyki 2010.
- Magiera T., Jabłońska M., Strzyszczyński Z., Bzowska G., *Technogeniczne cząstki magnetyczne w pyłach atmosferycznych jako nośnik metali ciężkich*, Inżynieria Środowiska pięć lat po wstąpieniu do Unii Europejskiej, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN 2009.
- Mishra P. D., Das S. K., *A study of physico – chemical and mineralogical properties of Talcher coal fly ash for stowing on underground coal mines*, Materials Characterization 2010.

- Myszkowska A., Świdarska – Ostapiak M., Szczygielski T., *Ocena i wytyczne wykorzystania popiołów ze współspalania w budownictwie i rolnictwa*, Forum Technologii w energetyce – spalanie biomasy, Bełchatów 2011.
- PN-EN 450-1:2012 - Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. z 2014 r., poz. 1923).
- Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S., *A review on biomass as a fuel for boilers*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011.
- Strzałkowska E., *Charakterystyka właściwości fizykochemicznych i mineralogicznych wybranych ubocznych produktów spalania węgla*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- Szklorzova H., Pavlitova – Letkova Z., Jancova J., Holesinsky R., *Problematyka produkcji i wykorzystania ubocznych produktów spalania węgla w Republice Czeskiej*, Popioły z energetyki 2009.
- Szponder D., *Badanie wybranych właściwości popiołów lotnych z zastosowaniem analizy obrazu*, Akademia Górniczo Techniczna, Kraków 2012.
- Szymanowicz R., *Właściwości fizykochemiczne paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych*, Energetyka 2012.
- Teixeira P., Lopes H., Gulynurtlu I., Lapa N., Abelha P., *Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co – firing with coal in a fluidized bed*, Biomass and Bioenergy 2012.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Pawluk A., Pyzalski M., *Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management 2016.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2018 r. poz. 1269).
- Ustawa dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2018 r., poz. 992).
- Wacławowicz R., *Rolnicze wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy*, Forum Technologii w energetyce – spalanie biomasy, Bełchatów 2011.
- Xiao R., Chen X., Wang F., Yu G., *The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature*, Renewable Energy 2011.
- Żygadło M., Woźnik M., *Obserwacje zmian właściwości popiołów powęglowych w procesach wietrzeniowych*, Energetyka 2009.