

ALICJA ULIASZ-BOCHEŃCZYK*, EUGENIUSZ MOKRZYCKI**

Mineralna sekwestracja CO₂ przy zastosowaniu odpadów energetycznych – próba oszacowania potencjału w Polsce

Wprowadzenie

Problem redukcji emisji CO₂ w energetyce zawodowej jest tematem wielu projektów. Energetyka zawodowa w Polsce podejmuje działania mające na celu obniżenie emisji CO₂ z procesów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Z tego względu realizowane są między innymi projekty i prace badawcze nad wprowadzeniem technologii CCS (Uliasz-Misiak 2011).

Polska energetyka zawodowa jako paliwo podstawowe stosuje węgiel kamienny i brunatny (Olkuski 2013). Branża ta jest największym emitentem CO₂ w Polsce (tab. 1). Jednocześnie w wyniku procesów wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej powstają odpady – przede wszystkim popioły lotne. Popioły lotne, ze spalania węgla kamiennego i węgla brunatnego, mogą być stosowane do wiązania CO₂ na drodze mineralnej karbonatyzacji (Johnson 2000; Back i in. 2006a, b; Back 2008; Montes-Hernandez i in. 2009; Uliasz-Bocheńczyk, Mokrzycki 2006; Uliasz-Bocheńczyk 2009). Najmniejszym potencjałem dla wykorzystania do mineralnej sekwestracji CO₂ charakteryzują się popioły ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych. Jest to spowodowane niską zawartością CaO. Jednak ich masowe wykorzystanie w technologiach górniczych może być argumentem przemawiającym na ich korzyść (tab. 2). Grupami odpadów energetycznych, które również zostały przebadane w kierunku wykorzystania do wiązania CO₂ są: mie-

* Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: aub@agh.edu.pl

** Prof. dr hab. inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energia PAN, Kraków.

TABELA 1

Emisja CO₂ ze spalania węgla z energetyki zawodowej (Emisor 1998–2007)

TABLE 1

CO₂ emission from coal combustion in professional power industry

Lata	Emisja całkowita [Gg]	Emisja ze spalania węgla kamiennego [Gg]	Emisja ze spalania węgla brunatnego [Gg]
2008	144 195	84 228	57 660
2009	144 227	87 301	54 344
2010	148 573	92 949	52 905
2011	150 188	91 019	56 472

szaniny popiołów lotnych z produktami odsiarczania, popioły z kotłów fluidalnych oraz odpady z pól suchych metod odsiarczania (Uliasz-Bocheńczyk 2009, 2010, 2011).

Zastosowanie zawiesin popiołowo-wodnych do sekwestracji CO₂ na drodze mineralnej karbonatyzacji, a następnie ich wspólne lokowanie, zostało zaproponowane parę lat temu (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2004, 2006, 2007). Badania laboratoryjne potwierdziły, że zawiesiny popiołowo-wodne są odpowiednie do sekwestracji CO₂ na drodze mineralnej karbonatyzacji (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2007; Uliasz-Bocheńczyk 2009, 2010, 2011).

Metoda mineralnej sekwestracji jest interesująca dla polskich elektrowni i elektrociepłowni, w których powstają znaczne ilości popiołów, od lat z powodzeniem stosowanych w formie zawiesin w różnych technologiach górniczych w kopalniach węgla. Z kolei popioły, które nie są wykorzystane gospodarczo mogą być również w ten sposób zagospodarowane, przy jednoczesnej redukcji CO₂.

W artykule autorzy przedstawili wstępne oszacowanie teoretycznej ilości CO₂, które mogą zostać związane na drodze mineralnej karbonatyzacji przy zastosowaniu odpadów energetycznych.

1. Gospodarcze zastosowanie odpadów energetycznych w Polsce

Odpady energetyczne ze względu na właściwości są w różnym stopniu wykorzystywane gospodarczo. Grupę odpadów, które są w pełni zagospodarowywane, stanowią popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych (10 01 02). Głównymi kierunkami wykorzystania gospodarczego popiołów to przede wszystkim górnictwo podziemne i przemysł materiałów budowlanych (tab. 2). Coraz więcej odpadów energetycznych stosowanych jest również w drogownictwie (Gruchot, Zydrón 2013; Kołodziejczyk i in. 2012; Baran i in. 2013). Mieszanki popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 82) są w pełni wykorzystywane, również w górnictwie i budowie dróg.

TABELA 2

Wykorzystanie gospodarcze odpadów energetycznych w Polsce ze spalania węgla kamiennego i brunatnego [Gg]

TABLE 2

Economic use of fly ash in Poland from hard coal and lignite combustion [Gg]

Rodzaj odpadu (kod)	Lata	Ilość uchwycona	Materiały budowlane	Cement	Budowa dróg	Górnictwo	Inne	Ilość niewykorzystana gospodarczo
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego (10 01 02)	2008	3 152,1	910,2	505,9	67,0	719,8	926,0	23,2
	2009	3 344,7	1 363,7	954,2	96,6	493,6	433,9	2,7
	2010	3 583,9	1 146,9	818,8	81,2	728,0	456,6	352,4
	2011	3 798,7	1 284,6	1 069,3	295,0	757,2	459,8	0
Popioły lotne ze spalania węgla brunatnego (10 01 02)	2008	330,4	–	–	–	–	25,0	305,4
	2009	487,8	89,0	–	–	–	44,4	354,4
	2010	539,9	110,9	–	–	–	196,9	232,1
	2011	821,7	190,3	–	–	–	291,2	481,5
Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (spalanie węgla kamiennego) (10 01 82)	2008	1 988,3	31,9	21,0	181,6	1 029,4	731,1	0
	2009	1 362,9	26,6	15,0	178,8	814,2	475,7	0
	2010	1 463,4	25,0	18,1	211,3	768,4	439,6	0
	2011	1 714,9	3,5	33,5	374,0	879,3	427,6	0
Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (spalanie węgla brunatnego) (10 01 82)	2008	2 167,0	–	–	–	–	2 167,0	0
	2009	1 914,5	–	–	–	–	31,3	1 883,2
	2010	2 165,4	–	–	–	–	11,4	2 154,0
	2011	2 331,2	–	–	–	–	16,7	2 314,5
Popioły lotne ze współspalania biomasy i węgla kamiennego (10 01 17)	2008	717,8	449,0	228,0	–	–	40,7	0,1
	2009	584,0	406,9	165,8	–	–	11,1	0,2
	2010	557,2	423,7	132,0	–	–	1,0	0,5
	2011	711,9	525,3	186,4	–	–	0,2	711,9
Odpady z pól suchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05)	2008	89,7	71,6	–	–	–	–	18,1
	2009	417,2	142,7	20,3	–	28,9	178,5	370,4
	2010	484,9	182,7	14,7	1,0	20,5	189,3	408,2
	2011	458,2	233,5	120,1	10,4	22,8	43,2	430,0

Źródło: Emitor 2007–2011

Wśród odpadów energetycznych problem stanowią popioły lotne ze spalania węgla brunatnego w kotłach konwencjonalnych (10 01 02) i mieszaniny popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 82). Odpady te są obecnie wykorzystywane w minimalnym zakresie. Jest to spowodowane ich niestabilnym składem chemicznym.

Jednak głównym kierunkiem zagospodarowania odpadów energetycznych jest górnictwo podziemne, które ma długoletnie doświadczenia w stosowaniu tego typu odpadów w formie zawiesin wodnych (Mazurkiewicz 1990; Mazurkiewicz, Piotrowski 1995, 2004).

Obecnie zawiesiny popiołowo-wodne są wykorzystywane w polskich kopalniach podziemnych m.in. do (Mazurkiewicz, Piotrowski 2004; Piotrowski 2011): likwidacji zbędnych wyrobisk korytarzowych, doszczelniania zrobów zawałowych, ograniczenia zagrożenia pożarowego, zmniejszania porowatości zawału w ścianach czynnych, wypełniania pustek za obudową wyrobisk korytarzowych, budowy korków podsadzkowych, wypełniania płytkich pustek poeksploatacyjnych i pustek Webera, wiązania wód silnie zmineralizowanych, podsadzania w zabierkowym systemie eksploatacji, tworzenia sztucznych stropów przy eksploatacji warstwowej.

Popioły lotne w formie zawiesin stosują spółki węglowe: Jastrzębska Spółka Węglowa SA, Katowicki Holding Węglowy SA oraz Kompania Węglowa SA (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2007).

2. Odpady ze spalania węgla jako surowiec do sekwestracji CO₂

Odpady stosowane do sekwestracji CO₂ powinny charakteryzować się wysoką zawartością CaO i wolnego CaO (Johnson 2000; Back i in. 2006), dzięki czemu reagują bezpośrednio z wodą.

Z grupy odpadów energetycznych do wiązania CO₂ mogą być stosowane:

- popioły lotne ze spalania węgla kamiennego i brunatnego w kotłach fluidalnych (10 01 82),
- popioły lotne ze spalania węgla kamiennego i brunatnego w kotłach konwencjonalnych (10 01 02),
- mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 82),
- odpady z półsuchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05).

W tabeli 3 przedstawiono średnie zawartości CaO i wolnego CaO w rozpatrywanych do sekwestracji odpadach energetycznych. Wartości te oraz średnie pochłanianie CO₂ (tab. 4) są obliczone na podstawie badań Autorów dotyczących mineralnej sekwestracji CO₂. Najwyższą zawartością CaO i wolnego CaO charakteryzowały się odpady z półsuchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05) i popioły lotne ze spalania węgla brunatnego w kotłach pyłowych (10 01 02); najniższą – popioły ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych (10 01 02).

TABELA 3

Średnie zawartości CaO i wolnego CaO w odpadach energetycznych [%]

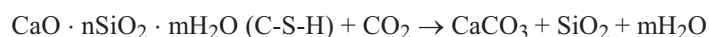
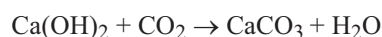
TABLE 3

Average CaO and free CaO contents in energetic wastes [%]

Odpady	Zawartość	
	CaO	CaO w.
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych (10 01 02)	5,1	0,6
Popioły lotne ze spalania węgla brunatnego w kotłach pyłowych (10 01 02)	24,7	4,6
Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych (10 01 82)	10,9	2,8
Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla brunatnego w kotłach fluidalnych (10 01 82)	15,7	9,6
Odpady z półsuchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05)	50,3	9,6
Popioły lotne ze współspalania biomasy i węgla kamiennego (10 01 17)	20,4	8,9

3. Mineralna sekwestracja w zawiesinach wodnych odpadów energetycznych

Podstawowymi fazami ulegającymi karbonatyzacji są: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i faza C-S-H, według następujących reakcji (Huijgen, Comans 2005):



Wśród produktów hydratacji ulegających karbonatyzacji należy wymienić również ettringit, krystaliczny glinian trójwapniowy C_3A i inne gliniany. Dodatkowo zawarte w popiele lotnym szkło glinowo-krzemianowe może ulegać aktywacji poprzez kwas węglowy.

Mineralna sekwestracja CO_2 jest procesem złożonym, w którym w przypadku zawiesin odpadowo-wodnych można wydzielić następujące etapy (Sun, Simons 2008; Fernandez Bertos i in. 2004):

1. Dyfuzja CO_2 do zawiesiny.
2. Solwatacja $\text{CO}_2(\text{g})$ do $\text{CO}_2(\text{aq})$.
3. Utworzenie H_2CO_3 .
4. Dysocjacja H_2CO_3 na H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} .
5. Migracja jonów Ca^{2+} z faz sorbentu do roztworu.

6. Zarodkowanie węglanów.

7. Wytrącanie się węglanów.

Do określenia potencjału odpadów energetycznych dla mineralnej sekwestracji wykorzystano wyniki badań pochłaniania CO₂. Można je określić jako ilość gazu, która uległa rozpuszczeniu na drodze fizycznej i chemicznej w wodzie, została zaadsorbowana na ziarnach odpadów oraz związana w formie węglanów (Montes-Hernandez i in. 2009).

W tabeli 4 zawarto średnie i maksymalne wartości pochłaniania CO₂ przez zawiesiny wodne odpadów energetycznych.

Największym średnim pochłanianiem CO₂ charakteryzowały się mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla brunatnego w kotłach fluidalnych (10 01 82); najniższym – popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych (10 01 02) oraz odpady z pól suchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05).

TABELA 4

Średnie wartości pochłaniania CO₂ przez zawiesiny odpadowo-wodne, CO₂/100 g popiołu

TABLE 4

Average values of waste-aqueous suspensions CO₂ absorption, CO₂/100 g of ash

Rodzaj	Pochłanianie CO ₂ [g CO ₂ /100 g odpadu]
Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych (10 01 02)	1,2
Popioły lotne ze spalania węgla brunatnego w kotłach pyłowych (10 01 02)	3,3
Mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych (10 01 82)	3,7
Mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla brunatnego w kotłach fluidalnych (10 01 82)	4,0
Popioły lotne ze współspalania biomasy i węgla kamiennego (10 01 17)	2,1
Odpady z pól suchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05)	1,2

Średnie pochłanianie CO₂ dla analizowanych odpadów wynosiło 2,6 g CO₂/100 g odpadu.

4. Oszacowanie ilości CO₂ o którą można zmniejszyć jego emisję ze spalania węgla przy zastosowaniu zawiesin wodnych odpadów energetycznych

Opłacalność wiązania CO₂ będzie zależała przede wszystkim od ilości CO₂, którą można poddać sekwestracji na drodze mineralnej karbonatyzacji. Z tego względu dla przemysłowej

sekwestracji CO₂ na drodze mineralnej karbonatyzacji przy zastosowaniu zawiesin powinny być brane pod uwagę przede wszystkim zawiesiny charakteryzujące się maksymalnym pochłanianiem CO₂. Ze względu na zmienność właściwości odpadów energetycznych i fakt, że nie zawsze będzie można uzyskać wartości maksymalne, do szacowania zastosowano średnie wartości pochłaniania CO₂ (tab. 4).

Do szacowania ilości CO₂, która może być zutylizowana za pomocą zawiesin odpadowo-wodnych, wykorzystano ilości poszczególnych grup odpadów stosowanych w górnictwie, jak również ilości odpadów gospodarczo niewykorzystanych (tab. 2) oraz wartości średnie z wyników badań pochłaniania zawarte w tabeli 4. Ilość odpadów niewykorzystanych gospodarczo w latach 2008–2011 wynosiła łącznie 10 042,8 Gg, co średnio wyniosło na rok –2510,7 Gg. Z kolei ilość odpadów wykorzystanych w górnictwie w latach 2008–2011 wyniosła łącznie 6262,1 Gg – średnio na rok 1565,5 Gg.

Potencjalne ilości ditlenku węgla zutylizowane w wyniku mineralnej karbonatyzacji przy wykorzystaniu odpadów energetycznych stosowanych w górnictwie i niewykorzystanych gospodarczo zamieszczono w tabeli 5.

TABELA 5

Potencjalna ilość CO₂, która może być zutylizowana przy wykorzystaniu krajowych odpadów energetycznych stosowanych w górnictwie i niewykorzystanych gospodarczo [Gg/rok]

TABLE 5

The potential amount of CO₂ that can be disposed of using domestic energetic waste used in mining and not economically used [Gg/year]

Rodzaj odpadu	Potencjalna ilość CO ₂ pochłonięta przy wykorzystaniu odpadów stosowanych w górnictwie	Potencjalna ilość CO ₂ pochłonięta przy wykorzystaniu odpadów niewykorzystanych gospodarczo
Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych (10 01 02)	8,1	1,1
Popiół lotny ze spalania węgla brunatnego w kotłach pyłowych (10 01 02)	0,0	11,3
Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapienych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych (10 01 82)	32,3	0,0
Mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapienych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla brunatnego w kotłach fluidalnych (10 01 82)	0,0	63,7
Popioły lotne ze współspalania biomasy i węgla kamiennego (10 01 17)	0,0	0,37
Odpady z póluchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05)	0,02	0,36
Łącznie	117,25	

Korzystając z danych zawartych w tabeli 5, przy łącznym zastosowaniu do utylizacji CO₂ mieszanin wodnych odpadów energetycznych ze spalania węgla kamiennego można obniżyć emisję CO₂ o 40,4 Gg/rok oraz 75 Gg/rok przy wykorzystaniu odpadów ze spalania węgla brunatnego.

Podsumowanie

Przy stosowaniu metody mineralnej karbonatyzacji, jako sposobu sekwestracji CO₂, bardzo ważnym aspektem jest problem składowania produktów karbonatyzacji. W przypadku lokowania zawiesin w kopalniach problem ten jest rozwiązany; również wtedy kiedy odpady nie są wykorzystane gospodarczo i trafiają na składowiska, mogą być stosowane do utylizacji CO₂.

Ilości CO₂, które można zutylizować dla poszczególnych grup odpadów energetycznych przy założeniu, że zastosowane zostaną odpady stosowane w górnictwie i niewykorzystane gospodarczo wynoszą:

- 9,2 Gg/rok CO₂ – przy wykorzystaniu popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych (10 01 02),
- 11,3 Gg/rok CO₂ – przy wykorzystaniu mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych (10 01 82),
- 32,3 Gg/rok CO₂ – przy wykorzystaniu popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego w kotłach pyłowych (10 01 02),
- 63,7 Gg/rok CO₂ – przy wykorzystaniu mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – popioły ze spalania węgla brunatnego w kotłach fluidalnych (10 01 82),
- 0,37 Gg/rok CO₂ – przy wykorzystaniu popiołów lotnych ze współspalania biomasy i węgla kamiennego (10 01 17),
- 0,38 Gg/rok CO₂ – przy wykorzystaniu odpadów z półsuchych metod odsiarczania gazów odlotowych (10 01 05).

Potencjalnie można obniżyć emisję CO₂ z energetyki zawodowej o 117,25 Gg/rok.

Mineralna sekwestracja pozwala na unieszkodliwienie o wiele mniejszych ilości ditlenku węgla w porównaniu z np. geologicznym składowaniem. Jednak ze względu na duże doświadczenia polskich kopalń (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2007) w stosowaniu na szeroką skalę technologii zawiesinowej i możliwość zastosowania odpadów mineralnych, których gospodarcze wykorzystanie jest ograniczone, może to być interesujące rozwiązanie ekologiczne, szczególnie, że odpady te wytwarzane są przez dużych emitentów ditlenku węgla.

LITERATURA

- Back M., Kühn M., Stanjek H., Peiffer S., 2008 – Reactivity of alkaline lignite fly ashes towards CO₂ in water. *Environmental Science & Technology*, 42, p. 4520–4526.
- Back M., Vosbeck K., Kühn M., Stanjek H., Clauser Ch., Peiffer S., 2006 a – Pretreatment of CO₂ with fly ashes to generate alkalinity for subsurface sequestration. *Proceedings Materials of 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. 19–22 June, Trondheim, Norway.
- Back M., Vosbeck K., Kühn M., Stanjek H., Clauser Ch., Peiffer S., 2006 b – Storage of CO₂ and generation of alkalinity from reaction of alkaline fly ashes with flue gas. *Proceedings Materials of 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. 19–22 June, Trondheim, Norway.
- Baran P., Cholewa M., Zawisza E., Kulasik K., 2013 – Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych. *Rocznik Ochrona Środowiska t. 15*, s. 2071–2089.
- Emitor 2008, 2009, 2010, 2011. *Emisja Zanieczyszczeń Środowiska w Elektrowniach i Elektrociepłowniach Zawodowych*, Agencja Rynku Energii, Warszawa.
- Fernandez Bertos M., Simons S.J.R., Hills C.D., Carey P.J., 2004 – A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. *Journal of Hazardous Materials B112*, p. 193–205.
- Gruchot A., Zydrón T., 2013 – Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego. *Rocznik Ochrona Środowiska t. 15*, s. 1719–1737.
- Huijgen W.J.J., Comans R.N.J., 2005 – Mineral CO₂ sequestration by carbonation of industrial residues. ECN. ECN-C-05-074. www.ecn.nl.
- Johnson D.C., 2000 – Accelerated carbonation of waste calcium silicate materials. *SCI Lecture Papers Series*, Society of Chemical Industry. ISSN 1353-114X.
- Kołodziejczyk U., Ćwiąkała M., Widuch A., 2012 – Use of fly-ash for the production of hydraulic binding agents and for soil stabilisation. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 28*, z. 4, s. 15–28.
- Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., 1995 – Propozycja unormowania badań będących podstawą dopuszczenia odpadów drobnofrakcyjnych do deponowania w pustkach podziemnych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 3*.
- Mazurkiewicz M., 1990 – Technologiczne i środowiskowe aspekty stosowania stałych odpadów przemysłowych do wypełniania pustek w kopalniach podziemnych. *Zeszyty Naukowe AGH nr 152*, Kraków.
- Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., 2004 – Problemy likwidacji kopalń podziemnych. *Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004*.
- Montes-Hernandez G., Pérez-Lopéz R., Renard F., Nieto J.M., Charlet L., 2009 – Mineral sequestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. *Journal of Hazardous Materials*, 161, p. 1347–1354.
- Olkuski T., 2013 – Ocena wystarczalności krajowych zasobów węgla kamiennego energetycznego w świetle perspektyw jego użytkowania. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 29*, z. 2, s. 25–38.
- Piotrowski Z., 2011 – Odzysk odpadów drobnofrakcyjnych w górnictwie podziemnym węgla kamiennego. *Archiwum Górnictwa. Monografia nr 12*. Wyd. IMG PAN, Kraków.
- Sun J., Simons S.J.R., 2008 – Accelerated carbonation of MSWI APC residues for sequestration of flue gas CO₂. *Accelerated carbonation of different size fractions of stainless steel slag. Proceedings of 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering*, 1–3 October, Roma, Italy, p. 191–200.
- Uliasz-Bocheńczyk A. (red), Mokrzycki E., Piotrowski Z., Pomykała R., 2007 – Składowanie CO₂ z zawiesinami popiołowo-wodnymi pod ziemią. *Wyd. IGSMiE PAN, Kraków*.
- Uliasz-Bocheńczyk A., 2009 – Mineralna sekwestracja CO₂ w wybranych odpadach. *Wyd. IGSMiE PAN, Kraków*.
- Uliasz-Bocheńczyk A., 2010 – Mineral sequestration of CO₂ in suspensions containing mixtures of fly ashes and desulphurization waste. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 26*, z. 4, p. 109–118.

- Uliasz-Bocheńczyk A., 2011 – Mineralna sekwestracja CO₂ przy zastosowaniu zawiesin wodnych wybranych popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 27, z. 1, s. 145–154.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mazurkiewicz M., Mokrzycki E., Piotrowski Z., 2004 – Utylizacja dwutlenku węgla poprzez mineralną karbonatyzację. *Polityka Energetyczna* z. 7, z. spec., s. 541–554.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., 2006 – Fly ashes from Polish power plants and combined heat and power plants and conditions of their application for carbon dioxide utilization. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 84, p. 837–842.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., 2006 – Utilization of carbon dioxide in fly ash and water mixtures. *Chemical Engineering Research and Design* vol. 84, is. A9 *Carbon Capture and Storage*, p. 843–846.
- Uliasz-Misiak B., 2011 – Wpływ geologicznego składowania CO₂ na środowisko. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 27, z. 1, s. 129–143.

**MINERALNA SEKWESTRACJA CO₂ PRZY ZASTOSOWANIU ODPADÓW ENERGETYCZNYCH –
PRÓBA OSZACOWANIA POTENCJAŁU W POLSCE**

Słowa kluczowe

CO₂, mineralna karbonatyzacja, odpady energetyczne

Streszczenie

Polska energetyka zawodowa jako paliwo podstawowe stosuje węgiel kamienny i brunatny, branża ta jest zarazem największym emitentem CO₂ w Polsce. W wyniku procesów produkcji energii elektrycznej i ciepłej powstają również odpady, m.in. popioły lotne, które w formie zawiesin mogą być stosowane do sekwestracji CO₂ na drodze mineralnej karbonatyzacji. Mineralna karbonatyzacja jako metoda obniżenia redukcji CO₂ jest szczególnie interesująca przy wykorzystaniu odpadów. W artykule przedstawiono wstępne oszacowanie możliwości obniżenia emisji CO₂ z energetyki zawodowej. Oszacowanie to przeprowadzono przy wykorzystaniu wyników badań stopnia pochłaniania CO₂ przez zawiesiny odpadowo-wodne oraz wielkość emisji ze spalania węgla w energetyce zawodowej. Do szacowania uwzględniono jedynie te odpady, które nie wymagają żadnej obróbki wstępnej, a zarazem mają potencjał dla wiązania CO₂, czyli: popioły lotne z kotłów konwencjonalnych, popioły z kotłów fluidalnych, mieszaniny popiołów z produktami odsiarczania, popioły lotne ze współspalania węgla kamiennego i biomasy oraz odpady z półsuchej metody odsiarczania. Przyjęto również założenie, że do sekwestracji mogą być stosowane te odpady, które są wykorzystywane w górnictwie oraz odpady niewykorzystane gospodarczo. Oszacowano, że ilości CO₂, które można zutilizować przy powyższych założeniach wynoszą około 117,25 Gg CO₂/rok.

**MINERAL SEQUESTRATION OF CO₂ WITH THE USE OF ENERGY WASTE –
AN ATTEMPT TO ESTIMATE THE POLISH POTENTIAL**

Key words

CO₂, mineral carbonation, energy waste

Abstract

Polish power industry uses coal or lignite as basic fuels. That is why this industry is the biggest emitter of CO₂ in the country. As a result of electricity and heat production appears some waste – fly ash, which while in the state

of suspension can be used for CO₂ sequestration by mineral carbonization. The mineral carbonization as a method to lower the reduction of CO₂ is especially interesting while using the waste. The article presents the estimation of lowering the CO₂ emission in the power industry with the use of water suspensions of energy waste. The results of researches on the level of CO₂ absorption by the waste-water suspension and emission from coal burning in the energy industry were used to conduct the estimation. Only the wastes which do not need the pre-treatment but have the potential to bind CO₂ were taken into consideration, that means: fly ash from the conventional boilers, ash from fluidal boilers, mixtures of ash and desulphurization products, fly ash from co-combustion of coal and bio-mass and waste from half-dry method of desulphurization. It was assumed that the sequestration may be conducted with the use of waste used in mining and waste which are commercially unexploited. It was estimated that this way about 117.25 Gg CO₂/year of CO₂ can be utilized every year.

