

Waldemar Kępyś, Zbigniew Piotrowski*, Ewa Wiśła-Walsh***

BADANIE WPŁYWU ZBRYLONYCH POPIOŁÓW ZE SPALARNI ODPADÓW KOMUNALNYCH NA WŁASNOŚCI ZAWIESIN POPIOŁOWO-WODNYCH***

1. Wstęp

Idea technologii górniczych stosujących zawiesiny sięga początku lat 80. ubiegłego wieku [5, 7, 10, 11, 14, 15]; zawiesiny te są wykorzystywane między innymi do:

- podszadzki samozestalającej się,
- doszczelniania i izolacji zrobów zawałowych,
- profilaktyki przeciwpożarowej,
- wiązania wód silnie mineralizowanych,
- w procesach likwidacji kopalń,
- jako środek transportu CO₂.

Jako materiały do wytworzenia zawiesin wykorzystuje się cały szereg drobnofrakcyjnych odpadów, takich jak:

- odpady poflotacyjne;
- odpady z osadników wód dołowych;
- popioły lotne z elektrowni (elektrociepłowni) zawodowych oraz przykopalnianych [3, 6];
- popioły lotne z produktami odsiarczania spalin [2, 9, 12, 21];
- popioły lotne z palenisk fluidalnych [1, 4];
- mieszaniny wyżej podanych odpadów pochodzących z tego samego zakładu energetycznego;
- mieszaniny odpadów energetycznych i odpadów i kopalnianych [8].

* Katedra Ekologii Terenów Górniczych, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Katedra Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*** Artykuł powstał w ramach realizacji projektu badawczego nr 4 T12A 009 26

Wiele z tych materiałów po zarobieniu z wodą nie ma zdolności samowiązających, stąd konieczne jest dodawanie do sporządzanych mieszanin odpowiednich lepiszczy, głównie cementu [17].

Popioły lotne powstające w czasie termicznego unieszkodliwiania odpadów komunalnych nie wykazują zdolności samowiązających porównywalnych np. z popiołami z węgla brunatnego i/lub popiołów ze spalania węgla kamiennych w paleniskach fluidalnych [8]. Jest to wynikiem ich składu chemicznego i fazowego, w którym nie występują typowe związki i/lub fazy odpowiedzialne za właściwości pucolanowe obecne w wyżej wspomnianych popiołach ze spalania węgla. Dodatkowo zawierają one w swoich składach związki, które z jednej strony uniemożliwiają ich zestalanie po dodatku nawet typowych lepiszczy, takich jak gips półwodny i/lub $\text{Ca}(\text{OH})_2$, z drugiej zaś strony – są przyczyną zwiększonej wymywalności wielu jonów, co uniemożliwia i tak ich stosowanie w technologii zawieszinowej bez uprzedniej modyfikacji ich właściwości fizykochemicznych [20].

Jedną z najprostszych możliwości zmian właściwości fizykochemicznych materiałów przeznaczonych do składowania i/lub wykorzystania jest ich granulacja z odpowiednimi lepiszczami i/lub dodatkami. Proces ten zapewnia w większości wypadków zarówno zmniejszenie wymywalności wielu jonów toksycznych, jak i zmianę pH eluatów, a ponadto otrzymany zgranulowany materiał może być zamiennikiem np. kruszyw naturalnych [13, 17, 18, 20].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wpływu dodatku zmiennych ilości granulatów otrzymanych z popiołów lotnych z termicznego unieszkodliwiania odpadów komunalnych na właściwości zawiesin.

Stosowany granulát otrzymano w wyniku granulacji w granulatorze talerzowym popiołów pochodzących ze spalarni odpadów komunalnych z dodatkiem cementu w charakterze lepiszcza i związków modyfikujących.

Badania wykonano według metodyk określonych w normie PN-G-11011: *Materiały do podsadzki zestalanej i doszczelniania zrobów* [16].

2. Część doświadczalna – materiały i metodyka badań

Do badań wykorzystano popiół fluidalny z Elektrowni „Elcho” z Chorzowa i granulát otrzymany z popiołów powstałych z termicznego unieszkodliwiania odpadów komunalnych.

W wyniku spalania odpadów komunalnych powstają dwa rodzaje popiołów:

- 1) popiół zza kotła odzysknicowego,
- 2) popiół z filtrów workowych.

W celu zmniejszenia wymywalności zanieczyszczeń chemicznych z tych popiołów poddano je granulacji wraz z dodatkiem cementu portlandzkiego CEM I 32,5 w charakterze lepiszcza i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jako stabilizatora wymywalności metali ciężkich.

W tabeli 1 podano podstawowe właściwości badanych popiołów, a mianowicie gęstość rzeczywistą (pomiar za pomocą piknometru helowego Micrometrics 1305) i wilgotność.

TABELA 1

Gęstość rzeczywista i wilgotność popiołów

Pochodzenie popiołu		Oznaczenie	Gęstość rzeczywista [Mg/m ³]	Wilgotność [%]
Popiół fluidalny z Elektrowni „Elcho” z Chorzowa		PF	2,12	0,14
Popiół ze spalarni odpadów komunalnych	Popiół z filtrów workowych	P1	2,298	0,61
	Popiół z kotła odzysknicowego	P2	2,710	0,13

Badanie wpływu dodatku granulatu na własności zawiesin rozpoczęto od wyznaczenia własności zawiesin sporządzonych z popiołów P1 i P2 oraz popiołu fluidalnego PF i ich mieszanin przy różnych stosunkach popiołu do wody (p/w). Kolejno badano zawiesiny sporządzone z mieszaniny popiołów P1 i P2 z dodatkiem cementu i wodorotlenku wapnia w stosunkach wagowych składników (s/w) takich, jakie stosowano w czasie otrzymywania granulatu. Ostatnim etapem badań prezentowanych w niniejszej pracy było określenie własności zawiesin popiołu fluidalnego zawierającego zmienne ilości granulatu w stosunku do zawiesiny (g/z) o uziarnieniu od 2,0 do 6,3 mm. Numery kolejnych próbek wraz z ich składami podano w tabelach 2 i 3.

TABELA 2

Zestawienie zawiesin sporządzonych z popiołów PF, P1, P2

Nr próbki	Ilości poszczególnych składników w zawieszynie [% wag.]					Stosunek wagowy składników do wody s/w
	PF	P1	P2	CEM I 32,5 R	Ca(OH) ₂	
1	0	49	12	24	15	1:1
2	0	49	12	24	15	1,3:1
3	0	49	12	24	15	1,5:1
4	39	49	12	0	0	1:1
5	0	75	25	0	0	1:1

TABELA 3

Zestawienie zawiesin sporządzonych z popiołu PF z dodatkiem i bez dodatku granulatu

Nr próbki	Stosunek wagowy popiołu PF do wody p/w	Stosunek wagowy granulatu do zawiesiny g/z
6	1:1	bez dodatku granulatu
7	1:1	0,15:1
8	1:1	0,3:1
9	0,95:1	bez dodatku granulatu
10	0,95:1	0,15:1
11	0,95:1	0,3:1

Na tak sporządzonych zawiesinach wykonano cykl badań, które objęły oznaczenie:

- gęstości,
- rozlewności,
- ilości wody nadosadowej (odstój),
- czasu tężenia,
- wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R_c) po 28 dniach sezonowania,
- wymywalności zanieczyszczeń chemicznych z zestalonych zawiesin po 28 dniach sezonowania (próba nr 3 i 8)

Badania wykonano zgodnie z normą PN-G-11011: *Materiały do podszadzki zestalanej i doszczelniania zrobów* [16].

3. Wyniki badań i dyskusja

Gęstość zawiesin, rozlewność i ilość wody nadosadowej

Gęstość zawiesin, rozlewność i ilość wody nadosadowej (odstój) pokazano w tabelach 4 i 5.

TABELA 4

Własności zawiesin z PF, P1, P2: gęstość zawiesiny, rozlewność i ilość wody nadosadowej

Nr próbki	Gęstość zawiesiny [Mg/m ³]	Rozlewność [mm]	Ilość wody nadosadowej [%]
1	1,38	210	0
2	1,47	200	0
3	1,53	180	0
4	1,38	260	2,9
5	1,67	240	0

TABELA 5

Własności zawiesin sporządzonych z popiołu PF z dodatkiem i bez dodatku granulatu: gęstość zawiesiny, rozlewność i ilość wody nadosadowej

Nr próbki	Stosunek wagowy popiołu PF do wody p/w	Stosunek wagowy granulatu do zawiesiny g/z	Gęstość zawiesiny [Mg/m ³]	Rozlewność [mm]	Ilość wody nadosadowej [%]
6	1:1	bez dodatku granulatu	1,40	190	6,9
7	1:1	0,15:1	1,52	185	5,2
8	1:1	0,3:1	1,53	170	5,0
9	0,95:1	bez dodatku granulatu	1,39	215	7,6
10	0,95:1	0,15:1	1,46	205	6,7
11	0,95:1	0,3:1	1,52	195	3,7

Porównując wyniki zamieszczone powyżej, można stwierdzić, że:

1. Gęstość sporządzonych zawiesin popiołowo-wodnych z dodatkiem lub bez dodatku granulatu spełnia normę PN-G-11011, w której minimalna gęstość mieszanin materiałów do podsadzki zestawianej i doszczelniania zrobów wynosi $1,2 \text{ Mg/m}^3$.
2. Gęstości zawiesin rosną zarówno ze zwiększeniem ilości popiołu w stosunku do wody, jak i ilości granulatu.
3. Rozlewność zawiesin sporządzonych z popiołów P1, P2, cementu i Ca(OH)_2 (tab. 4) maleje wraz ze wzrostem ilości składników od 210 do 180 mm, dla zawiesiny z P1, P2 i PF (próbka nr 4) wynosi 260, natomiast dla zawiesiny sporządzonej tylko z mieszaniny popiołów P1 i P2 (próbka nr 5) 240 mm. Zwraca uwagę fakt, że próbki nr 1 i 4, posiadające identyczne gęstości rzeczywiste, wykazują różną rozlewność, a mianowicie 210 i 260 mm, co wskazuje na znaczny wpływ składu chemicznego zawiesiny na jej własności fizykochemiczne (lepkość).
4. Dla takich samych ilości popiołu i wody w zawieszynie dodatek granulatu powoduje zmniejszenie się rozlewności w stosunku do próbek bez granulatu. W przypadku zawiesin, w których stosunek p/w wynosił 1:1, rozlewność była równa 190 mm, zmniejszyła się do 185 mm po dodaniu do zawiesiny 15% wag. granulatu (próbka 7) i do 170 mm po dodaniu 30% granulatu (próbka 8). Dla zawiesin o stosunku popiołu do wody $p/w = 0,95:1$ rozlewność spadała od 215 mm (bez granulatu), poprzez wartość 205 mm dla próbki nr 10 do 195 mm dla zawiesiny z 30% granulatu (próbka nr 11).
5. Ilość wody nadosadowej (odstój) spełnia wymagania normy (maks. 7%) oprócz próbki nr 9, w której norma przekroczona jest o 0,6%. Dodatek granulatu obniża ilość wody nadosadowej; dla zawiesiny o stosunku p/w 1:1 bez dodatku granulatu wynosi 6,9%, natomiast dla zawiesiny z dodatkiem 30% granulatu wynosi 5,0%. W przypadku zawiesiny, w której p/w wynosi 0,95:1, odstój był równy 7,6%, dodatek 30% granulatu spowodował jego zmniejszenie do 3,7%.

Czas tężenia

Oznaczenia czasu tężenia zawiesin dokonano, wykorzystując aparat Vicata o ciężarze walca i igły 335 g, średnicy igły 1,1 mm oraz długości 50 mm. Zawiesinę wlewano do pojemników walcowych. Za początek wiązania uznaje się moment, gdy igła w czasie 30 sekund nacisku zanurza się na głębokość 30 mm; z uwagi na występowanie w zawieszynie granulatu, który często blokował zanurzającą się igłę, dla zawiesin z granulem odstępiono od oznaczenia początku wiązania i określono tylko koniec z chwilą, gdy igła zanurzała się na głębokość $0 \div 2$ mm. Czas tężenia zawiesin pokazano w tabelach 6 i 7.

Jak pokazują dane zamieszczone w tabelach 6 i 7, dla zawiesin wykonanych z mieszanin popiołów P1, P2 z dodatkiem cementu i Ca(OH)_2 (nr 1–3) początek i koniec wiązania zależy od ilości mieszaniny w stosunku do wody w ten sposób, że im większy jest stosunek s/w , tym zawiesina zaczyna wiązać szybciej i czas wiązania jest krótszy (wynosi odpowiednio 48, 24 i 6 godzin).

Zawiesina sporządzona tylko z popiołów P1 i P2 (próbka 5) charakteryzuje się znacznie późniejszym początkiem wiązania oraz dłuższym czasem wiązania (72 godziny). Dodatek do zawiesiny sporządzonej z popiołów P1 i P2 w ilości około 40% popiołu fluidalnego PF powoduje wydłużenie czasu wiązania o 24 godziny, co na tym etapie badań następcza trudności interpretacyjne.

TABELA 6

Czas tężenia zawiesin z PF, P1, P2

Nr próbki	Czas tężenie zawiesin	
	początek [godz.]	koniec [godz.]
1	48	96
2	24	48
3	18	24
4	120	216
5	120	192

TABELA 7

Czas tężenia zawiesin sporządzonych z popiołu PF z dodatkiem i bez granulatu

Nr próbki	Stosunek wagowy popiołu PF do wody <i>p/w</i>	Stosunek wagowy granulatu do zawiesiny <i>g/z</i>	Czas tężenie zawiesin	
			początek [godz.]	koniec [godz.]
6	1:1	bez dodatku granulatu	48	72
7	1:1	0,15:1	–	72
8	1:1	0,3:1	–	72
9	0,95:1	bez dodatku granulatu	48	72
10	0,95:1	0,15:1	–	72
11	0,95:1	0,3:1	–	72

Z kolei można stwierdzić, że dla zawiesin sporządzonych z popiołu PF i granulatu koniec czasu wiązania następował po upływie 72 godzin, podobnie jak i w przypadku zawiesiny wykonanej z samego popiołu, z tym że początek tężenia nie był możliwy do wyznaczenia.

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – *R_c*

Badaniu na jednoosiowe ściskanie poddano próbki zestalonych zawiesin, sezonowanych przez 28 dni w formach o wysokości i średnicy wynoszącej 80 mm. Sezonowanie odbywało się w warunkach powietrzno-suchych. Średnie wartości wyników tych badań dla próbek zawiesin popiołowo-wodnych sporządzonych z popiołu PF z dodatkiem lub bez dodatku granulatu przedstawiono w tabelach 8 i 9.

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie zestalonych zawiesin dla próbek od 1 do 5 jest mniejsza od 0,5 MPa. Dla próbki sporządzonej z mieszaniny popiołów P1, P2 z cementem i wodorotlenkiem wapnia ta wartość została prawie osiągnięta, *R_c* wynosi 0,47 MPa.

TABELA 8

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie zestalonych zawiesin PF, P1, P2

Nr próbki	Ilości poszczególnych składników w zawieszynie [% wag.]					Stosunek wagowy składników do wody s/w	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c [MPa]
	PF	P1	P2	CEM I 32,5	Ca(OH) ₂		
1	0	49	12	24	15	1:1	0,08
2	0	49	12	24	15	1,3:1	0,38
3	0	49	12	24	15	1,5:1	0,47
4	39	49	12	0	0	1:1	0,36
5	0	75	25	0	0	1:1	0,01

TABELA 9

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek zestalonych zawiesin

Nr próbki	Stosunek wagowy popiołu PF do wody p/w	Stosunek wagowy granulatu do zawiesziny g/z	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c [MPa]
6	1:1	bez dodatku granulatu	0,63
7	1:1	0,15:1	0,79
8	1:1	0,3:1	1,60
9	0,95:1	bez dodatku granulatu	0,56
10	0,95:1	0,15:1	0,86
11	0,95:1	0,3:1	1,25

Zestalone zawiesziny z popiołu PF charakteryzują się wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie od 0,56 do 1,60 MPa. Widoczny jest wyraźny wzrost wytrzymałości zawiesin z dodatkiem granulatu w porównaniu z zawieszynami tylko z samym popiołem fluidalnym. W przypadku zawiesin o stosunku $p/w = 1:1$ zanotowano wzrost o 0,16 MPa dla próbki nr 2 oraz o prawie 1 MPa dla próbki z zawartością 30% granulatu. Natomiast dla zawiesin, w których $p/w = 0,95:1$, nastąpił wzrost wytrzymałości o 0,3 MPa (próbka 10) i o ok. 0,7 MPa (próbka 11). Należy zaznaczyć, że wszystkie zestalone zawiesziny spełniały wymagania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie określone w stosownej normie dla materiałów do podsadzki zestalanej.

Wymywalność zanieczyszczeń chemicznych

W tabeli 10 przedstawiono wymywalności zanieczyszczeń chemicznych: z popiołu fluidalnego PF, z mieszaniny popiołów P1 i P2 przed granulacją, z samego granulatu dodawanego do zawiesziny (granulat z P1, P2, cementu i Ca(OH)₂), z zestalonej zawiesziny nr 8 ($p/w = 1:1$ oraz $g/z = 0,3:1$) oraz z zestalonej zawiesziny nr 3 ($s/w = 1,5:1$). Dla zobra-

zowania wpływu dodatku Ca(OH)_2 na ilość wymywanych zanieczyszczeń z granulatu dodatkowo w tabeli 10 podano wymywalność dla zgranulowanych popiołów P1, P2 z CEM I 32,5R.

TABELA 10

Wymywalność zanieczyszczeń chemicznych

Wskaźnik lub rodzaj zanieczyszczenia	Jednostka	Wielkość dopuszczalna w wodach ściekowych	Mieszanka popiołów P1 i P2 przed granulacją	Granulat (z P1, P2, CEM I)	Granulat (z P1, P2, CEM I i Ca(OH)_2)	Zestawiona zawiesina p/w = 1:1 z dodatkiem 30% granulatu	PF
1	2	3	4	5	6	7	8
pH	–	6,0÷12,0	11,68	11,81	12,02	12,09	8,93
Chlorki	mg/dm ³	1000	16 398,4	6980	5571,00	1997,00	396,5
Siarczany		500	2266,2	374,9	317,4	659,10	554,6
Sód		800	1704,6	1073,6	785,70	433,30	45,28
Potas		80	2387,8	1603,7	1198,00	420,00	7,14
Cynk		2,0	12,5	0,045	0,029	0,012	0,017
Kadm		0,1	0,0048	0,00096	0,00055	0,00011	0,00023
Nikiel		2,0	0,005	0,0041	0,038	0,00177	0,001
Ołów		0,5	85,1	1,86	0,755	0,00077	0,00015
Miedź		0,5	0,25	0,0066	0,0045	0,0038	0,00058
Chrom		0,7	0,98	0,094	0,095	0,035	0,0105
Rtęć		0,02	0,04	0,00156	0,00143	0,00026	0,00085
Wapń		–	6984,4	2374	2230,00	929,90	1254

W wyniku granulacji popiołów P1 i P2 z cementem zmniejszeniu uległy wymywalności jonów chlorkowych o 57,5% (w porównaniu z mieszaniną popiołów P1 i P2), dodatek Ca(OH)_2 do granulatu (kolumna 6) spowodował zmniejszenie wymywalności o 66,02% (w porównaniu z mieszaniną popiołów P1 i P2). Dla jonów siarczanowych wymywalność zmniejszyła się odpowiednio o 83,4% i o 85,99%, dla jonów sodu spadek wymywalności wyniósł 37,5% i 53,9%, natomiast dla jonów cynku wymywalność zmniejszyła się o prawie 100% w obu przypadkach. Generalnie granulacja zmniejsza wymywalność wszystkich jonów od 37,5% do prawie 100%, dodatek wodorotlenku wapnia do granulowanych popiołów zwiększa pH eluatu, z drugiej strony obniża jeszcze bardziej ilości wymywanych jonów metali ciężkich, takich jak np. Zn, Pb, z granulatu. Dodatek granulatu w ilości 30% do zawiesiny z popiołu PF powoduje dalsze „rozcieńczenie” ilości wymywanych zanieczyszczeń chemicznych prócz jonów siarczanowych.

4. Wnioski końcowe

Granulowanie popiołów ze spalarni odpadów komunalnych zmniejsza ilość wymywanych zanieczyszczeń chemicznych.

Przedstawione w artykule badania wskazują, że istnieje możliwość sporządzenia zawieszin z dodatkiem granulatu, które mogą być zastosowane w technologii zawieszinowej. Własności badanych zawieszin z granulatem wskazują na to, że dodatek granulatu do zawiesziny poprawia jej własności:

- zwiększa wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
- zmniejsza rozlewność,
- zmniejsza ilość wody nadosadowej (odstój),
- nie wpływa na czas wiązania.

LITERATURA

- [1] *Anthony E.J., Berry E.E., Blondin J., Bulewicz E.M., Byrwell S.*: Advanced Ash Management Technologies for CFBC Ash. Waste Management, 23, 2003, 503–516
- [2] *Bengtsson S.*: Semi-Dry FGD End Product Utilisation – European Experiences. Fly Ash Library: www.flyash.info
- [3] *Black D.C., Ziemkiewicz P.F.*: Full Scale Injection of Coal Combustion Byproducts into an Underground Mine to Control Acid Mine Drainage and Subsidence. www.netl.doe.gov/publications/proceedings/98/98ps/2b-2.pdf
- [4] *Black D.C., Ziemkiewicz P.F.*: Disposal of Fluidized-Bed Combustion Ash in a Underground Mine to Control Acid Mine Drainage and Subsidence. Final Report (February 1994 – November 2000) for U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Morgantown, West Virginia, DOE Contract No. DE-FC21-94MC29244
- [5] *Chugh Y.P., Biswas D., Deb D.*: Underground Placement of Coal Processing Waste and Coal Combustion By-Products Based Paste Backfill for Enhanced Mining Economics. DOE Final Report: DE-FC26-99FT40553, 2002, 1–88
- [6] *Gurdeep S., Bradley C.P.*: Assessment of Groundwater Quality Impacts due to use of Coal Combustion Byproducts to Control Subsidence from Underground Mines. Environment International, 26, 2001, 567–571
- [7] *Hycnar J.J.*: Wykorzystanie odpadów z przeróbki i spalania węgla kamiennego. Materiały Konferencji „Wykorzystanie odpadów kopalnianych i pyłów elektrownianych w aspekcie ochrony środowiska”, Instytut Mechaniki Górniczej PAN, Kraków 24 czerwca 1993, 1–17
- [8] *Kamon M., Katsumi T., Sano Y.*: MSW Fly Ash Stabilized with Coal Ash for Geotechnical Application. Journal of Hazardous Materials, 76, 2002, 2665–283
- [9] *Lamminen M., Wood J., Walker H., Chin Yu-P., He Y., Traina J.*: Effect of Flue Gas Desulfurization (FGD) By-Products on Water Quality at an Underground Coal Mine. J. Environ. Qual., 30, 2001, 1371–1381
- [10] *Mazurkiewicz M., Piotrowski Z.*: Wpływ czasu na zmianę własności odpadów ulokowanych w pustkach podziemnych. Materiały Konferencji „Teoretyczne i praktyczne problemy zagospodarowania odpadów hutniczych i przemysłowych”, Krynica 19–21 maja 2005
- [11] *Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., Tajduś A.*: Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych. Cz. 1. Ekologia i technologia. Kraków, PAN CPPGSMiE 1997
- [12] *Meiers R.J., Golden D.M., Yu W-Ch., Gray R.E.*: Reducing Mine Subsidence with Fixated FGD Sludge. EPRI, 1995, Book 1, 1–19
- [13] *Mięso R., Wisła-Walsh E., Kepys W., Piotrowski Z.*: Scalanie odpadów niebezpiecznych – bezpieczne składowanie i wykorzystanie. Ochrona i inżynieria środowiska: zrównoważony rozwój; Szkoła Ochrony i Inżynierii Środowiska im. Walerego Goetla Kraków, KIS PAN, 2004, Monografie, Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Środowiska, nr 25, 41–48

- [14] *Pella D., Pelizza S.*: Civil Reuses og Underground Mine Openings: A Summary of International Experience. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10, 1995, 179–181
- [15] *Plewa F., Myslek Z.*: Zagospodarowanie odpadów przemysłowych w podziemnych technologiach górniczych. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2001
- [16] PN-G-011: Materiały do podsadzki zestalanej i doszczelniania zrobów – wymagania i badania
- [17] *Rademaker P.D., Wiegers R.B.*: The processing of Industrial Waste for Immobilization and/or Recycling Applying Pozzolanic Reactions, *Environmental Technology*. De Waal K.J.A., Van Den Drink W.J. (Ed.), Proceedings of the Second European Conference on Environmental Technology, Amsterdam, The Netherlands, June 22–26 1987
- [18] *Rossetti V.A., Di Palma L., Medicie F.*: Assessment of the leaching of Metallic Elements in the Technology of Solidification in Aqueous Solution. *Waste Management*, 22, 2002, 605–610
- [19] *Sevim H., Gwamaka S.M., Lei D.D.*: Enggineering and Cost Analyses of Coal Combustion by Product Transportation and Handling Systems. *Mining Engineering*, October 1997, 69–74
- [20] *Valls S., Vazquez E.*: Leaching Properties of Stabilized/Solidified Cement-Admixtures-Sewage Sludges Systems. *Waste Management*, 22, 2002, 37–45
- [21] *Zysk K.-H., Schroer D.*: Possible Application for Flue Gas Desulphurization Products in Coal Miting. *Zement-Kalk-Gips*, 7, 1993, E192-E197