

OCENA ZDOLNOŚCI RETENCYJNYCH WYBRANYCH ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH

Sławomir Klatka, Magdalena Malec, Marek Ryczek, Edyta Kruk,
Ewelina Zajęc

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań zdolności retencyjnych wybranych odpadów przemysłowych pod kątem możliwości ich wykorzystania w rekultywacji technicznej i biologicznej. Krzywe charakterystyki wodnej zostały wyznaczone w komorach niskociśnieniowych z porowatą płytą ceramiczną oraz sparametryzowane do równania van Genuchtena. Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że najmniej korzystne zdolności retencyjne mają odpady poflotacyjne i muły węglowe, a średnie – odpady hutnicze i posodowe. Najlepsze właściwości retencyjne mają odpady elektrowniane i elektrociepłowniane. Przeprowadzona analiza wykazała, że zdolności retencyjne badanych odpadów zależą głównie od ich składu granulometrycznego.

Słowa kluczowe: odpady przemysłowe, zdolności retencyjne, rekultywacja

WSTĘP

W porównaniu z latami ubiegłymi ilość wytwarzanych odpadów przemysłowych w naszym kraju zdecydowanie maleje [Strzyszczyk i Łukasik 2008]. W roku 2014 wytworzono 131,3 mln ton odpadów innych niż komunalne. Głównym źródłem odpadów było jednak, podobnie jak w latach poprzednich, górnictwo [GUS 2015]. Gromadzone na składowiskach odpady ze względu na swoje pochodzenie oraz sposób zagospodarowania czy rekultywacji mogą w różnym stopniu zagrażać środowisku przyrodniczemu [Jureczyk i Koc-Jureczyk 2014]. Problemy z pozyskaniem nowych miejsc pod lokalizację składowisk zmuszają do opracowywania nowych metod zagospodarowania odpadów [Gilewska 2006]. Węgiel kamienny stanowi podstawowe paliwo energetyczne w naszym kraju, co sprawia, że ilość odpadów wytwarzanych przez sektor wydobywczy

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Sławomir Klatka, dr inż. Magdalena Malec, dr hab. inż. Marek Ryczek, dr inż. Edyta Kruk, dr inż. Ewelina Zajęc, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: m.malec@ur.krakow.pl, rmklatka@cyf-kr.edu.pl, rmryczek@cyf-kr.edu.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

będzie nadal głównym i dominującym strumieniem odpadów przemysłowych [Boroń i Klatka 1999]. Wśród odpadów powęglowych dominują odpady powstające przy poszukiwaniu i wydobywaniu kopalin oraz odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla [Boroń i in. 2010b]. Inne gałęzie przemysłu, jak np. przemysł energetyczny, chemiczny czy hutnictwo stali, również generują poważne ilości odpadów poprodukcyjnych, które są gromadzone na składowiskach. W warunkach polskich sporadycznie wykorzystuje się odpady przemysłowe, np. energetyczne czy hutnicze, do rekultywacji składowisk innych odpadów, np. pogórnich [Strzyszczyński i Łukasik 2008]. Na etapie oceny możliwości rekultywacji składowisk z wykorzystaniem odpadów poprzemysłowych kluczowe jest poznanie ich właściwości fizyko-wodnych. Właściwości te, obok zawartości metali ciężkich, determinują zakres niezbędnych prac w ramach rekultywacji technicznej i biologicznej. Według Szafraniec i in. [2011] brak wieloletnich badań właściwości wodnych gleb na terenach pogórnich wpływa na małą skuteczność stosowanych zabiegów rekultywacyjnych.

Celem pracy była analiza wybranych właściwości fizyko-wodnych oraz zdolności retencyjnych odpadów przemysłowych do oceny ich wykorzystania w rekultywacji terenów zdegradowanych.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Badaniami objęto dwa rodzaje materiałów powęglowych oraz cztery typy odpadów: elektrowniane, elektrociepłniane, hutnicze i posodowe. Pierwszy odpad powęglowy stanowił materiał pochodzący z flotacyjnego wzbogacania węgla Kopalni Węgla Kamiennego „Szczygłowice” w Knurowie. W jego składzie występują duża ilość frakcji ilastej poniżej 1 mm [Boroń i in. 2010b]. Drugim materiałem były muły węglowe, popłuczkowe przetworzone w łatwo transportowalny granulata. Omawiane odpady powęglowe są poddawane odzyskowi oraz już częściowo wykorzystywane do rekultywacji terenów zdegradowanych eksploatacją górnictw. Próbkę do badań laboratoryjnych pobrano na obszarze zwałowisk pogórnich Kopalni „Szczygłowice” w Knurowie oraz pozyskano na terenie zakładu przerobczego odpadów pogórnich w Zabrze. Pozostałe materiały stanowiły: odpady elektrowniane pobrane z osadnika odpadów w Przechlebiu koło Gliwic, odpady elektrociepłniane z osadnika w Mogile Elektrociepłowni Łęg w Krakowie, odpady hutnicze z osadnika Huty Sendzimira w Krakowie-Pleszowie oraz odpady posodowe z osadnika odpadów byłych Krakowskich Zakładów Sodowych „Solvay”. W ramach badań laboratoryjnych wyznaczono: wybrane właściwości fizyko-wodne, współczynnik filtracji oraz krzywe charakterystyki wodnej. Przeprowadzone badania wykonane zostały zgodnie z procedurami stosowanymi w ocenie przydatności gruntów do rekultywacji i metodami standardowo stosowanymi w gleboznawstwie [Namiernik i in. 1995, Mocek i in. 1997]. Gęstość fazy stałej wyznaczono piktometrycznie w wodzie destylowanej. Właściwości fizyko-wodne (gęstość objętościową i porowatość ogólną) wyznaczono metodą cylinderków Kopecky’ego o objętości 100 cm³, natomiast współczynniki filtracji zostały oznaczone w laboratorium metodą spadku ciśnienia w aparacie opartym o prawo Darcy, z regulowaną wysokością ciśnienia wody i elektronicznym odczytem objętości wody. Krzywe wodnej retencyjności zostały oznaczone w aparacie Richardsa

(w komorach nisko ciśnieniowych) [Kowalik 1972] oraz sparametryzowane do równania van Genuchtena [Wösten i van Genuchten 1988, Boroń i Ryczek 1999]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha \cdot h|^n\right)^m}$$

gdzie:

- θ – objętościowa zawartość wody w glebie aktualna, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,
- θ_r – objętościowa zawartość wody w glebie w stanie, w którym następuje zatrzymanie jej ruchu, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,
- θ_s – objętościowa zawartość wody w glebie w stanie pełnego nasycenia, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,
- h – ciśnienie ssące, cm,
- α, n – parametry równania wyznaczone metodami statystycznymi,

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Na podstawie krzywych pF określono podstawowe właściwości wodne odpadów, do których należą:

- połowa pojemność wodna (PPW) – odpowiadająca procentowi wody przy pF 2,5,
- granicę wody łatwo dostępnej dla roślin (WŁD) – odpowiadająca procentowi wody przy pF 3,2,
- zawartość wody odpowiadającą punktowi trwałego wędnięcia roślin (WTW) – odpowiadająca procentowi wody przy pF 4,2.

WYNIKI BADAŃ

Wśród badanych materiałów odpad poflotacyjny, muł węglowy, odpady elektrociepłowniane i hutnicze, posiadały wartości gęstości objętościowej zbliżone do wartości najczęściej występujących w glebach gliniastych, ilastych i pyłowych Polski w zależności od ich struktury, które wahają się w granicach od 0,90 do 1,60 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [Mocek 2015]. Zbliżone wyniki dla mułów węglowych uzyskali Doniecki i Siedlecka [2006], którzy wskazują, że materiał ten charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami fizycznymi. Odpad elektrowniany oraz posodowy mają znacznie niższe wartości gęstości objętościowej (średnio 0,54 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Najwyższą wartość gęstości fazy stałej posiada odpad hutniczy oraz odpad elektrociepłowniany, najniższą zaś odpad elektrowniany (tab. 1). Porowatość ogólna warunkuje stosunki powietrzno-wodne, które w znacznym stopniu decydują o możliwości wykorzystania danego materiału w rekultywacji. Za najbardziej optymalny uznaje się zazwyczaj układ, w którym wartość porowatości ogólnej wynosi około 50% [Mocek 2015]. W przypadku badanych materiałów można stwierdzić, że prawie wszystkie charakteryzują się optymalną wartością porowatości ogólnej. Wyjątek stanowi odpad posodowy i elektrowniany.

Wyznaczone współczynniki filtracji wskazują, że najbardziej przepuszczalny jest muł węglowy, którego wartość współczynnika filtracji na poziomie ok. 4,3 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$, pozwala zaliczyć go wg Soil Survey Division Staff [1993] do dużej klasy filtracji. Fakt ten wynika

z technologii produkcji tego materiału, który przekształcany jest w łatwo transportowalny granulatu. Najniższą wartość współczynnika filtracji uzyskano dla odpadu posodowego i elektrownianego, co powala zaliczyć te odpady do średniej klasy filtracji (tab. 1). Wartości współczynników filtracji uzależnione są podobnie jak właściwości fizyczne od składu granulometrycznego badanych materiałów, który zostały omówione w pracach Ryczka i in [2007] oraz Boronia i in [2010].

Tabela 1. Właściwości fizyczne oraz współczynnik filtracji badanych odpadów
Table 1. Physical properties and filtration coefficient of investigated wastes

Materiał Material	Właściwość – Property			
	Gęstość objętościowa Bulk density $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Gęstość fazy stałej Specific density $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Porowatość ogólna Total porosity % obj. – vol.	Wsp. filtracji Filtration coefficient $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
Odpad poflotacyjny Flotation waste	1,31	2,04	58,02	2,36
Muł węglowy Coal loam	1,25	2,09	60,60	4,28
Odpad elektrowniany Power station waste	0,95	0,52	38,50	1,23
Odpad elektrociepłowniany Thermal power plant waste	0,91	2,48	57,41	1,64
Odpad hutniczy Metallurgical waste	1,36	2,42	50,59	2,36
Odpad posodowy Soda waste	0,56	1,05	32,50	0,56

Tabela 2. Parametry do modelu van Genuchtena
Table 2. Parameters for the van Genuchten' equation

Materiał Material	α	n	θ_s	θ_r
	cm^{-1}	—	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	
Odpad poflotacyjny Flotation waste	0,0279	1,3000	0,465	0,170
Muł węglowy Coal loam	0,0177	1,3220	0,475	0,240
Odpad elektrowniany Power station waste	0,0057	1,8353	0,565	0,040
Odpad elektrociepłowniany Thermal power plant waste	0,0060	1,7926	0,565	0,050
Odpad hutniczy Metallurgical waste	0,0110	1,9004	0,442	0,030
Odpad posodowy Soda waste	0,2273	1,1298	0,804	0,010

W tabeli 3 zestawiono charakterystyczne stany uwilgotnienia analizowanych odpadów przemysłowych:

- efektywną retencję użyteczną (ERU), dla wilgotności w przedziale pF od 2,5 do 3,2, czyli zapas wody łatwo dostępnej dla roślin w warstwie odpadu 0–100 cm,
- potencjalną retencję użyteczną (PRU) odpowiadającą wilgotności odpadu w przedziale pF od 2,5 do 4,2 czyli zapas wody ogólnie dostępnej dla roślin w warstwie odpadu 0–100 cm.

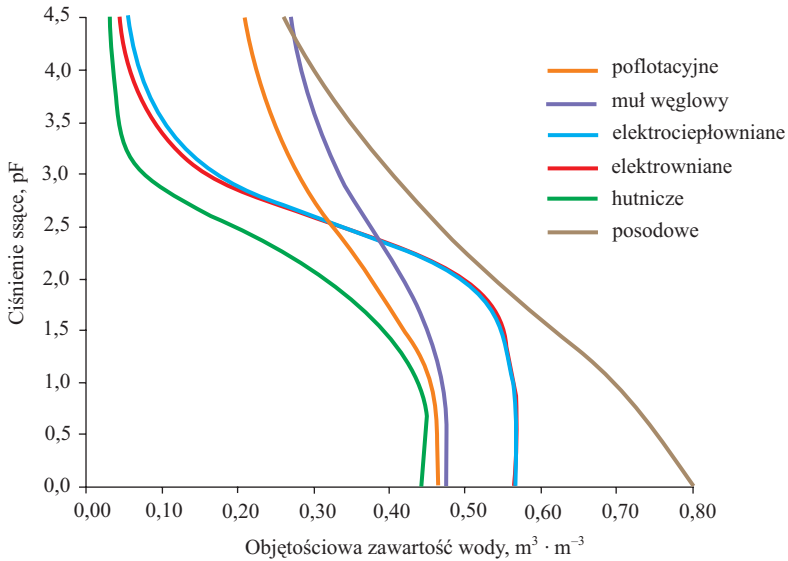
Tabela 3. Zawartość wody oraz charakterystyczne stany uwilgotnienia odpowiadające procentowi wody przy pF 2,5, pF 3,2, pF 4,2

Table 3. Water content and characteristics moisture states corresponding to percent of water at pF 2,5, pF 3,2, pF 4,2

Materiał Material	Objęściowe zawartości wody Volumetric water content $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$			Zapasy wody w warstwie 0–100 cm Water storage in the layer 0–100 cm	
	$\theta_{\text{pF}=2,5}$	$\theta_{\text{pF}=3,2}$	$\theta_{\text{pF}=4,2}$	ZWOD (PRU) TAWC	ZWŁD (ERU) EAWC
Odpad poflotacyjny Flotation waste	0,322	0,264	0,217	10,5	5,8
Muł węglowy Coal loam	0,372	0,320	0,278	9,4	5,2
Odpad elektrowniany Power station waste	0,321	0,123	0,052	26,9	19,8
Odpad elektrociepłowniany Thermal power plant waste	0,325	0,136	0,064	26,1	18,9
Odpad hutniczy Metallurgical waste	0,159	0,061	0,034	12,5	9,8
Odpad posodowy Soda waste	0,465	0,380	0,284	18,1	8,5

Najniższą wartość objęściowej zawartości wody w punkcie polowej pojemności wodnej (pF 2,5) stwierdzono dla odpadu hutniczego i wynosiła ona $0,159 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Najwyższą zanotowano dla odpadu posodowego: $0,465 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (tab. 3). Objęściowa zawartość wody w punkcie hamowania wzrostu roślin (pF 3,2) wyniosła od $0,061 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ dla odpadu hutniczego do $0,320 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ dla mułu węglowego. W punkcie trwałego wędnięcia roślin (pF 4,2) wartość najniższą posiada odpad hutniczy: $0,034 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, natomiast najwyższą odpad posodowy: $0,284 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Zapasy wody odpowiadający wodzie dostępnej dla roślin badanych odpadów wynosiły od 5,2 cm dla mułu węglowego do 19,8 cm dla odpadu elektrownianego. Zapas wody odpowiadający wodzie ogólnie dostępnej wynosił od 9,4 cm dla mułu węglowego do 26,9 cm dla odpadu elektrownianego. Są to wartości niższe od spotykanych dla terenów pogórnicych podlegających rekultywacji [Szafrński i in. 2011]. Najmniej korzystnymi



Ryc. 1. Krzywe wodnej retencyjności badanych odpadów
 Fig. 1. Retention curves of the investigated wastes

właściami retencyjnymi charakteryzują się odpady poflotacyjne i muł węglowy. Odpady te mogą być jednak wykorzystywane w rekultywacji odpadów pogórnich, w których przeważa frakcja o granulacji 30–250 mm [Strzyczek i Łukasik 2008]. W tym przypadku powinno się je mieszać z wierzchnimi warstwami zwałowanego materiału. Należy jednak zaznaczyć że powinny one spełniać normy określone dla gruntów stosowanych w rekultywacji przez Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. [Rozporządzenie... 2002]. Średnimi właściwościami retencyjnymi charakteryzują się odpady hutnicze i posodowe. Pierwsze z nich posiadają najczęściej korzystny dla roślin skład i właściwości chemiczne [Strzyszczyk i Łukasik 2008]. Z kolei osady posodowe z uwagi na zasadowy odczyn i wysokie wartości zasolenia, którego miarą jest przewodność elektrolityczna, właściwe nie powinny być stosowane w rekultywacji [Boroń i in. 2010b]. Najlepsze właściwości retencyjne wykazują odpady elektrowniane i elektrociepłniane. Z uwagi na wysoką zawartość frakcji pyłu są narażone na erozję wietrzną. Do rekultywacji składowisk tych odpadów wykorzystać można odpady powęglowe, co zabezpieczy przed pyleniem i poprawia warunki początkowe rekultywacji biologicznej [Strzyszczyk i Łukasik 2008]. Wyznaczone krzywe charakterystyki wodnej mułu węglowego i odpadu poflotacyjnego są do siebie zbliżone. Podobnie krzywe wyznaczone dla odpadów elektrownianych i elektrociepłnianych. Związane jest to z niewielkim zróżnicowaniem składu granulometrycznego tych odpadów. Pomimo niewielkiej różnorodności, wyznaczone krzywe wodnej retencyjności oraz zdolności retencyjne badanych odpadów mogą stanowić podstawę do oceny możliwości ich wykorzystania w rekultywacji technicznej i biologicznej.

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Większość z badanych materiałów odpadowych charakteryzuje się gęstością objętościową, gęstością fazy stałej i porowatością ogólna zbliżoną do najczęściej występujących w glebach gliniastych, ilastych i pyłowych Polski. Wyjątek stanowi odpad elektrowniany oraz posodowy, co związane jest z dużą zawartością frakcji pyłu w tych materiałach. Na podstawie analizy wyznaczonych współczynników filtracji badanych opadów stwierdzono, że muł węglowy należy do klasy dużej filtracji. Stan taki związany jest z technologią produkcji tego odpadu przekształconego w łatwo transportowalny granulat. Najniższą wartość współczynnika filtracji uzyskano dla odpadu posodowego i elektrownianego, które zakwalifikowano do średniej klasy filtracji.
2. Najniższe zapasy wody odpowiadające wodzie dostępnej dla roślin stwierdzono dla mułu węglowego, najwyższe zaś dla opadów elektrownianych. Podobnie najniższym zapasem wody odpowiadającej wodzie ogólnie dostępnej charakteryzował się muł węglowy, a najwyższym odpad elektrowniany. Odpad w postaci mułu węglowego może być jednak stosowany w reaktywacji terenów pogórnich, lecz powinno się go mieszać z wierzchnimi warstwami zwałowanego materiału w celu poprawy właściwości wodnych.
3. Najmniej korzystnymi zdolnościami retencyjnymi charakteryzują się odpady poflotacyjne i muł węglowy, średnimi zaś odpady hutnicze i posodowe. Najlepsze właściwości retencyjne wykazują odpady elektrowniane i elektrociepłowniane. Uzyskane wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że zdolności retencyjne badanych odpadów zależą głównie od ich składu granulometrycznego. Wyznaczone krzywe wodnej retencyjności mogą stanowić podstawę do oceny możliwości wykorzystania badanych odpadów w rekultywacji technicznej i biologicznej.

PIŚMIENICTWO

- Boroń, K., Klatka, S. (1999). Evaluation of farmland degradation induced by coal mine activity. 10th International Soli Conference, May 23–28, 1999, Purdue University, USA, 118–121.
- Boroń, K., Klatka, S., Ryczek, M., Zajac, E. (2010a). Reclamation and cultivation of the Cracow soda plant lagoons. International Conference on Construction for a Sustainable Environment, Vilnius, Lithuania, 245–250
- Boroń, K., Klatka, S., Ryczek, M., Koperski, T., Lech, B. (2010b). Odczyn i przewodnictwo elektrolityczne wybranych materiałów powęglowych stosowanych w rekultywacji. *Ochr. Środ. Zasob. Natur.*, 41, 385–390.
- Boroń, K., Ryczek, M. (1999). Hydraulic conductivity in unsaturated zone of silt and ash. *Proc. of the International Symposium on Advances in water science, vol. I: Physics of soil water*. Stara Lesna, Slovakia.
- Doniecki, T., Siedlecka, E. (2006). Odpadowe muły węglowe jako element izolacji. *Górn. Geoinż.*, 30(3/1), 41–46
- Gilewska, M. (2006). Wykorzystanie odpadów w rekultywacji gruntów pogórnich i składowisk popiołowych. *Rocz. Glebozn.*, LVII(1/2), 75–81.
- Główny Urząd Statystyczny [GUS] (2015). *Ochrona Środowiska*. Warszawa.
- Jurczyk, Ł., Koc-Jurczyk, J. (2014). Changes in the approach to waste disposal and generation of the leachate. *Arch. Gosp. Odpad. Ochr. Środ.*, 16(1), 31–40

- Kowalik, P. (1972). Podstawy teoretyczne pomiarów potencjału wody glebowej. *Probl. Agrofiz.*, 2, 5–46.
- Mocek, A. (2015). *Gleboznawstwo*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Mocek, A., Drzymała, S., Moszner, P. (1997). *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*. Wydawnictwo AR, Poznań.
- Namiernik J., Łukasiak J., Jamrógiewicz Z. (1995). *Pobieranie próbek środowiskowych do analizy*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. *Dz.U. z 2002 r. Nr 165, poz. 1359*.
- Ryczek, M., Boroń, K., Klatka, S. (2007). Wpływ dodatków organicznych na właściwości hydrauliczne wybranych odpadów przemysłowych. *Ochr. Środ. Zasob. Natur.*, 33, 93–96.
- Soil Survey Division Staff (1993). *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook, 18.
- Strzyszczyk, Z., Łukasik, A. (2008). Zasady stosowania różnorodnych odpadów do rekultywacji biologicznej terenów poprzemysłowych na Śląsku. *Gosp. Odpad.*, 24(2/3), 41–49.
- Szafrański, Cz., Stachowski, P., Kozaczyk, P. (2011). Stan aktualny i prognozy poprawy gospodarki wodnej gruntów na terenach pogórnich. *Rocz. Ochr. Środ.*, 13, 485–510.
- Wösten, J.H.M., Van Genuchten, M.Th. (1988). Division s-6-soil and water management and conservation. *Soil Sci. Soc. AM. J.*, 52 (The Netherlands).

EVALUATION OF RETENTION ABILITY OF CHOSEN INDUSTRIAL WASTES

Abstract. In the work there were presented results on investigations on retention ability of industrial wastes regarding possibility to use them in technical and biological reclamation. Water characteristic curves were determined in pressure chamber with porous ceramic plate and parameterized for the van Genuchten's equation. Analysis of obtained results shows the least advantageous retention ability have flotation wastes and coal loam and the average ability have metallurgical and soda wastes. The best retention properties have power plant and thermal power plant wastes. The analysis showed that retention ability depends mostly on texture of wastes.

Key words: industrial wastes, retention ability, reclamation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.11.2016

Do cytowań – For citation: Klatka, S., Malec, M., Ryczek, M., Kruk, E., Zajęc, E. (2016). Ocena zdolności retencyjnych wybranych odpadów przemysłowych. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumictus*, 15(4), 53–60.