

Adam Masłoń¹, Janusz A. TOMASZEK¹, Ireneusz OPALIŃSKI², Adam PIECH³

e-mail: amaslon@prz.edu.pl

¹ Katedra Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów² Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów³ Zakład Oczyszczania i Ochrony Wód, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

Właściwości fizykochemiczne pylistej formy keramzytu w aspekcie wspomaganie usuwania fosforu ze ścieków

Wstęp

Wspomaganie osadu czynnego stosuje się celem zwiększenia wydajności biologicznego oczyszczania ścieków oraz uzyskania stabilności pracy systemów z osadem czynnym, jednocześnie eliminując negatywne zjawiska związane z obecnością bakterii nitkowatych. W zależności od stosowanych środków wyróżnić można wspomaganie chemiczne (koagulanty), biologiczne (biopreparaty) i mineralne.

W zakresie mineralnego wspomaganie technologii osadu czynnego stosowane są mineralne substancje pyliste o wielkości cząstek poniżej 300 µm. Zainteresowanie wykorzystaniem materiałów pylistych w technologii osadu czynnego wynika z ich właściwości fizykochemicznych, m.in. porowatości, niskiej gęstości pozornej, nierozpuszczalności w ściekach oraz zdolności sorpcyjnej. Zastosowanie znalazły substancje inertne, jak i sorbenty, np. zeolity, diatomity, minerały ilaste oraz materiały odpadowe – popioły lotne [Masłoń i Tomaszek, 2012]. Jednym z materiałów pylistych stosowanych w technologii osadu czynnego może być keramzyt. Keramzyt (ekspandowana glina) jest sztucznym kruszywem budowlanym powstałym z surowców mineralnych poddanych obróbce termicznej. Dobre właściwości sorpcyjne i filtracyjne keramzytu powodują, że znalazł on zastosowanie w technologii uzdatniania wody i oczyszczania ścieków [Masłoń i Tomaszek, 2010]. Pylista forma keramzytu (<200 µm) testowana była w badaniach nad poprawą właściwości sedymentacyjnych osadu czynnego [Masłoń i in., 2013] oraz w aspekcie wspomaganie biologicznego oczyszczania ścieków [Masłoń i Tomaszek, 2013, Masłoń, 2013].

Aplikowane do osadu czynnego materiały pyliste w zależności od charakterystyki fizykochemicznej mogą pełnić równolegle następujące zróżnicowane, lecz wzajemnie uzupełniające się funkcje: obciążnika kłaczek osadu czynnego poprawiającego jego strukturę i właściwości (1) i/lub sorbenta substancji chemicznych występujących w ściekach (2) i/lub mikroosobnika biomasy immobilizowanej (3). Synergizm wyżej zdefiniowanych funkcji materiału pylistego w osadzie czynnym nie pozwala zwykle na określenie dominującej roli tylko jednej z nich [Masłoń i Tomaszek, 2012].

Celem pracy były badania właściwości fizykochemicznych pylistej formy keramzytu w aspekcie wspomaganie usuwania fosforu ze ścieków i przydatności w technologii osadu czynnego.

Badania doświadczalne

Materiały

Materiał badawczy stanowiła pylista frakcja keramzytu pochodząca z procesu sortowania i klasyfikowania kruszywa gruboziarnistego Leca® KERAMZYT z Zakładu Produkcyjnego Weber w Gniewie (Saint-Gobain Construction Products Polska sp. z o.o.).

Aparatura i metodyka

Charakterystykę uziarnienia pylistego keramzytu wyznaczono w oparciu o metodę dyfrakcji laserowej za pomocą analizatora Mastersizer 2000 E firmy Malvern Instruments Ltd.

Pomiary gęstości rzeczywistej wykonano za pomocą piknometru helowego AccuPyc 1330 firmy Micromeritics. Za pomocą czystego helu wyznaczono objętość badanej próbki wraz z odchyleniem standardowym, a wyniki te posłużyły do obliczenia gęstości rzeczywistej ρ . Wykonano 5 równoległych pomiarów dla każdej próby keramzytu pylistego. Przed właściwymi pomiarami, próbki były wstępnie desorbowane poprzez 10-krotne przepłukiwanie czystym helem. Powierzchnię właściwą oraz pomiar wielkości i rozkład porów określono na podstawie przebiegu izotermy adsorpcji/desorpcji par azotu

w temperaturze ciekłego azotu (77K). Pomiary wykonano za pomocą wielofunkcyjnej aparatury do pomiaru powierzchni właściwej i porowatości ASAP 2010 produkcji firmy Micromeritics. Powierzchnię właściwą S_{BET} wyznaczono w oparciu o teorię wielowarstwowej adsorpcji Brunauera-Emmeta-Tellera. Przed pomiarem powierzchnia badanej próbki była poddana desorpcji poprzez działanie temperatury 105°C, próżni oraz przepłukiwanie czystym helem. Czas odgazowywania próbki wynosił ok. 8 h. Do obliczeń powierzchni właściwej wykorzystano dane z izotermy adsorpcji z zakresu ciśnień względnych p/p_0 , od ok. 0,06 do ok. 0,20. Objętość porów V_p została określona z objętości zaadsorbowanego azotu przy ciśnieniu $p/p_0 = 0,97$. Średnice porów D_p wyznaczono wg zależności $D_p = 4V_p/S_{BET}$.

Gęstość usypową i upakowaną, ściśliwość i kohezynność określono za pomocą urządzenia Powder Tester PT-S (HOSOKAWA MIKRON).

Analizę powierzchni pylistych cząstek keramzytu wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM typu JEOL 5500 LV.

Skład chemiczny pylistego keramzytu określono metodą fluorescencji rentgenowskiej całkowitego odbicia wiązki padającej (TXRF) za pomocą spektrometru rentgenowskiego S2 PICOFOX™ firmy Bruker AXS Microanalysis GmbH. Metoda TXRF pozwala określić śladowe ilości pierwiastków w próbkach ciekłych oraz stałych próbkach nieorganicznych i organicznych. Metoda TXRF została sprawdzona w laboratoriach i obecnie staje się konkurencyjną w odniesieniu do uznanych metod, takich jak ET-AAS i ICP-OES. Jako standard wewnętrzny zastosowano 20 µl roztworu galu o stężeniu 10 mg/dm³.

Stopień wymywania pierwiastków z keramzytu pylistego określono wg normy PN-EN 12457-4. W wyciągu wodnym określono stężenie wymywanych składników (mg/dm³) metodą TXRF (S2 PICOFOX™, Bruker AXS Microanalysis GmbH). Testy konduktywności przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 27888:1999, a pH określono metodą potencjometryczną zgodnie z normą PN-91/C-04540/01.

Badania pojemności sorpcyjnej fosforu przez pylisty keramzyt przeprowadzono w warunkach statycznych, nieprzepływowym. Roztwór podstawowy o stężeniu 1,0 g P/dm³ przygotowano na bazie wody dejonizowanej i KH₂PO₄. Do 12 kolbek stożkowych dodawano 1 g pylistego keramzytu oraz 50 cm³ roztworu modelowego o stężeniach 2, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175 i 200 mg P/dm³. Próbkę wytrząsano mechanicznie przez 24 h w temperaturze 20°C. W przefiltrowanym roztworze oznaczano zawartość fosforu ogólnego zgodnie z normą PN-EN 1189:2000. Uzyskane dane opisano równaniem izotermy Langmuira:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m} \quad (1)$$

gdzie:

C_e – stężenie równowagowe fosforu w fazie ciekłej [mg P/dm³]

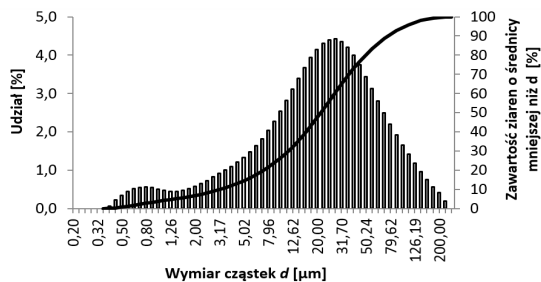
K_L – stała Langmuira

q_m – maks. pojemność sorpcyjna wg modelu Langmuira [mg P/g]

q_e – ilość fosforu zaadsorbowanego przez pylisty keramzyt [mg P/g]

Wyniki i dyskusja

Pylisty keramzyt posiada postać miękkiego pyłu mineralnego w kolorze od jasno- do ciemnoszarego. Wielkość cząstek pylistego keramzytu mieści się w klasie ziarnowej 0÷200 µm i wynika bezpośrednio z przygotowania materiału do badań poprzez przesiewanie przez sito o prześwicie oczek równym 0,2 mm. Najmniejsze ziarna keramzytu o wielkości < 20,0 µm stanowią ok. 50% udziału. Z kolei ilość ziaren keramzytu o wielkości 20÷50 µm oraz 50÷100 µm kształtuje się na poziomie odpowiednio 30% i 14,4%.



Rys. 1. Rozkład uziarnienia pylistego keramzytu

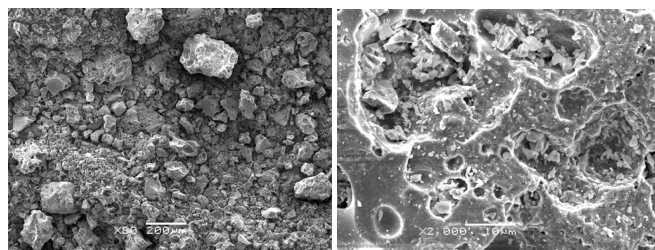
Klasa ziarnowa największych cząstek z zakresu 100÷200 µm stanowi zaledwie 5,5% udziału (Rys. 1). Pylisty keramzyt cechuje znaczna jednorodność pod względem uziarnienia ($C_u = 1,05$; $C_c = 1,43$). W pyłe keramzytowy dominują przede wszystkim małe ziarna o wielkości $d < 50 \mu\text{m}$, a duże okruchy stanowią tło ziarnistości. Szczegółowe parametry uziarnienia zaprezentowano w tab. 1.

Tab. 1. Charakterystyka keramzytu pylistego

	Jednostka	Wartość
Parametry uziarnienia		
d_{10}	[µm]	3,643
d_{50}	[µm]	24,11
d_{90}	[µm]	85,279
średnia średnica powierzchniowa SMD	[µm]	7,576
średnia średnica objętościowa VMD	[µm]	36,421
wskaźnik jednorodności uziarnienia C_u	-	1,05
wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c	-	1,43
rozpiętość	-	3,386
proporcja powierzchni do objętości ziaren S_v	[cm ² /cm ³]	792,0
proporcja powierzchni do masy ziaren S_m	[cm ² /g]	295,06
Właściwości fizyczne		
gęstość rzeczywista ρ	[g/cm ³]	2,6842±0,0023
objętość porów V_p	[cm ³ /g]	0,001329
średnica porów D_p	[nm]	7,3043
Powierzchnia właściwa S_{BET}	[m ² /g]	0,7409
Wskaźniki płynności		
gęstość upakowana ρ_{up}	[g/cm ³]	1,264
gęstość usypowa ρ_{us}	[g/cm ³]	0,765
ściśliwość	[%]	39,5
kohezynność	[%]	33,4
wskaźnik Hausnera HR	-	1,65

Ziarna pyłu keramzytowego posiadają średnio rozwiniętą strukturę porowatą w zakresie mikro-, makro- i mezoporów. Powierzchnia właściwa SBET pyłu keramzytowego jest niewielka w porównaniu do innych materiałów porowatych testowanych w technologii osadu czynnego, np. zeolit – 45,3 m²/g [Wei i in., 2010], bentonit – 60 m²/g [Wiszniewski i in., 2007], klinoptylolit – 320 m²/g [Park i in., 2002]. Niezwykle istotną właściwością mechaniczną wszystkich substancji pylistych jest ich zdolność do płynięcia określaną mianem sypkości. Przeprowadzone badania wskaźników płynności wykazały, że pył keramzytowy charakteryzuje się właściwościami spójnego proszku i stanowi materiał trudno zsypany (HR>1,25). Znajomość charakterystyki sypkości ma istotne znaczenie w przypadku opracowania i projektowania rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń technologicznych służących do dawkowania pyłu keramzytowego w technologii osadu czynnego. Gęstość usypowa i upakowana wyniosła odpowiednio 0,765 i 1,264 g/cm³ i pozwala ocenić stopień wypełnienia pylistym keramzytem zbiorników bądź silosów używanych do jego magazynowania w oczyszczalni ścieków.

Badania mikroskopii SEM pozwoliły zobrazować oraz zidentyfikować kompozycję i kształt cząstek pylistego keramzytu. W próbkach pylistego keramzytu stwierdzono znaczną różnicę w zakresie wielkości i morfologii ziaren. Badania mikroskopowe wykazały, że pył keramzytowy składa się głównie z okruchów o kształcie i budowie nieregularnej. Cząstki pylistego keramzytu wykazują bardzo zróżnicowane formy (Rys. 2a). Zaobserwowano ziarna wydłużone o ostrych krawędziach, obecne są też izometryczne ostrokrawędziste ziarna. Stwierdzono również płaskie ziarna keramzytu o gładkiej powierzchni. W pyłe keramzytowy największe ziarna posiadają rozmiary maksymalnie 170÷200 µm.



Rys. 2. (a) Ziarna pylistego keramzytu. (b) ziarno o wielkości ok. 200 µm, którego przestrzenie wypełnione są cząstkami keramzytu o wielkości < 4,0 µm (pow. 2000x).

Charakteryzują się one porowatą strukturą, z przestrzeniami otwartymi o wielkości do 20 µm. Przestrzenie wewnątrz dużych ziaren wypełnione są drobniejszymi ziarnami o zróżnicowanym uziarnieniu w zakresie 0,2÷4,0 µm (Rys. 2b). Znaczna różnica w postaciach ziaren pylistego keramzytu wynika przede wszystkim z ich pochodzenia. Część cząstek pylistych powstaje w wyniku kruszenia dużych ziaren podczas obróbki i sortowania. Z kolei większość innych mikrocząstek wynika ze ścierania się kruszywa keramzytowego na linii technologicznej w zakładzie produkcyjnym (transport przenośnikami taśmowymi, sita itp.). Część mikrocząstek pochodzi z powierzchni zewnętrznej ziaren keramzytu – z twardej powłoki, inne pochodzą z przestrzeni wewnątrz łamanych i kruszonych ziaren kruszywa keramzytowego.

Z uwagi na wysokotemperaturowy proces wypału gliny, keramzyt stanowi materiał mineralny. Podczas wypału surowca w temperaturze >1100°C następuje całkowite usunięcie organicznych składników. Keramzyt pylisty charakteryzuje się odczynem alkalicznym, o pH 8,4. Analiza składu chemicznego pylistego keramzytu wykazała znaczne ilości krzemu, glinu, żelaza, pierwiastków alkalicznych oraz śladową zawartość metali ciężkich (Tab. 2).

Tab. 2. Skład chemiczny pylistego keramzytu oraz wymywalność składników chemicznych

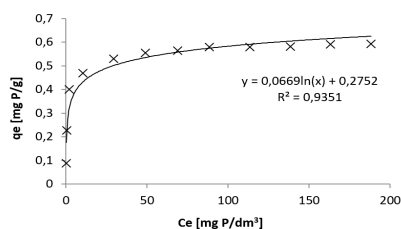
Składnik	Ilość pierwiastka w keramzytcie		Ilość wymywanego składnika [µg/g]
	Zawartość	Jednostka	
Glin (Al)	64,8±0,14	[mg Al/g]	-
Krzem (Si)	243,88±18,2	[mg Si/g]	264,87±99,02
Wapń (Ca)	74,59±0,20	[mg Ca/g]	532,22±152,69
Potas (K)	22,76±0,87	[mg K/g]	426,33±79,91
Żelazo (Fe)	68,60±1,40	[mg Fe/g]	1,12±1,03
Tytan (Ti)	3,45±0,22	[mg Ti/g]	-
Mangan (Mn)	0,48±0,05	[mg Mn/g]	0,095±0,050
Wanad (V)	113,14±11,35	[µg V/g]	0,262±0,025
Chrom (Cr)	192,25±17,34	[µg Cr/g]	0,028±0,007
Chlor (Cl)	199,33±0,1	[µg Cl/g]	29,29±9,54
Nikiel (Ni)	66,26±5,39	[µg Ni/g]	-
Miedź (Cu)	56,55±4,20	[µg Cu/g]	-
Cynk (Zn)	666,14±67,51	[µg Zn/g]	0,089±0,035
Arsen (As)	35,53±1,44	[µg As/g]	0,207±0,05
Rubid (Rb)	226,86±44,05	[µg Rb/g]	0,334±0,060
Stront (Sr)	274,55±34,09	[µg Sr/g]	1,664±0,426

Głównym składnikiem pylistego keramzytu, w przeliczeniu na tlenki są: SiO₂ (59,12%), Al₂O₃ (12,24%), CaO (10,44%), Fe₂O₃ (9,81%), K₂O (2,74%) oraz TiO₂ (0,58%). Skład chemiczny pylistego keramzytu jest zbliżony ze składem kruszywa keramzytowego gruboziarnistego. Niemniej jednak zaobserwowano różnice w składzie pyłu i kruszywa keramzytowego. Odnotowana wyższa zawartość SiO₂ we frakcji pylistej wynika z pochodzenia cząstek pyłu (ze ścierania czerepu zewnętrznego). Z kolei większa ilość Fe₂O₃ z pewnością jest spowodowana obecnością żelaza ścieranego ze stalowych elementów urządzeń produkcyjnych. Do niepożądaných składników keramzytu, w aspekcie wykorzystania w technologii osadu czynnego należą metale ciężkie. Ilość metali ciężkich w pyłe keramzytowy jest śladowa i porównywalna z zawartością w kruszywie keramzytowym.

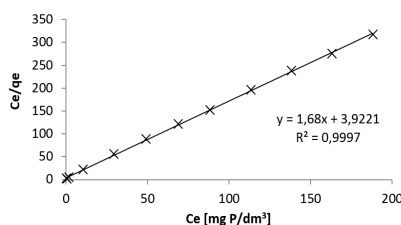
Ilość metali ciężkich w kruszywie keramzytowym kształtuje się na poziomie: 337,0 µg Zn/g; 49,6 µg Cu/g; 70,2 µg Ni/g; 203,0 µg Cr/g; 546,0 µg Mn/g i 6,19 µg As/g. Dodatkowo w odróżnieniu do pyłu, w gruboziarnistym kruszywie odnotowano obecność kadmu i ołowiu na poziomie odpowiednio 3,56 µg Cd/g i 64,4 µg Pb/g [Zakład Produkcyjny Weber]. Analiza eluatów wykazuje na niewielkie wymywanie

składników zawartych w pyłku keramzytowym (Tab. 2). Konduktywność wyciągu wodnego wynosi 0,692 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a pH 9,90. Niska wymywalność metali ciężkich z pyłu keramzytowego wynika prawdopodobnie z ich ścisłego zintegrowania w matrycy krystalicznej keramzytu, która powstaje w wysokiej temperaturze w czasie wypalania surowca.

Zdolność keramzytu do sorpcji fosforu związana jest z jego składem chemicznym (zawartość glinu, wapnia i żelaza). Przeprowadzone testy laboratoryjne wykazały znaczącą zdolność sorpcyjną pylistego keramzytu. Maksymalna pojemność sorpcyjna pyłu keramzytowego wyznaczona eksperymentalnie wyniosła 0,593 mg P/g (Rys. 3). Parametry modelu otrzymanego w wyniku analizy regresji liniowej wyniosły: $q_m = 0,5952$ mg P/g oraz $K_L = 0,4283$ (Rys. 4).



Rys. 3. Izoterma sorpcji fosforu przez pylisty keramzyt



Rys. 4. Izoterma Langmuira dla keramzytu pylistego

Mechanizm sorpcji fosforu na pyłku keramzytowym jest na tyle złożony, że nie można jednoznacznie określić na podstawie uzyskanych wyników jaki proces jest determinujący w aspekcie wiązania fosforu. Konieczne są bowiem szczegółowe badania mechanizmu i procesów sorpcji fosforu przez pylisty keramzyt. Uzyskana w badaniach pojemność sorpcyjna pyłu keramzytowego jest porównywalna z wartościami uzyskiwanymi dla kruszywa gruboziarnistego *Leca® KERAMZYT* (0,42±0,67 mg P/g).

Opierając się na doniesieniach literaturowych można stwierdzić, że czynnikiem limitującym sorpcję fosforu przez keramzyt oprócz składu chemicznego jest budowa, gęstość oraz wielkość i kształt ziaren kruszywa. *Zhu i in.* [1997] testowali zróżnicowane rodzaje ekspandowanej gliny w aspekcie usuwania fosforu. Najwyższą pojemność sorpcji (3,56 mg P/g) wykazał keramzyt *UTELITE®* posiadający w swoim składzie 465 mg Ca/g, 147 mg Al/g oraz 33 mg Fe/g. Niższą sorpcję fosforu, odpowiednio na poziomie 1,39 i 2,21 mg P/g osiągnęli przy zastosowaniu *Filtralite™ I* (248 mg Ca/g; 85 mg Al/g, 30 mg Fe/g) oraz *Filtralite™ II* (310 mg Ca/g; 119 mg Al/g, 34 mg Fe/g) (*Zhu i in.*, 1997). Wysoką zdolność sorpcji fosforu rzędu 2,5 mg P/g odnotowali *Ádám i in.* [2007] mimo, że skład keramzytu *Filtralite P* jest uboższy o składniki aktywne (31 mg Ca/g, 5,7 mg Fe/g, 20 mg Al/g). Tak wysoką sorpcję fosforu przez *Filtralite P* należy tłumaczyć wysokorozwiniętą powierzchnią właściwą kruszywa. Wysoka zawartość wapnia w keramzytynie nie zawsze prowadzi jednak do zwiększenia pojemności sorpcyjnej fosforu. *Cao i in.* [2012] badając keramzyt produkowany z popiołów lotnych zaobserwowali wyższy poziom wiązania fosforanów w materiale mniej zasobnym w metale Ca, Al i Fe. *Zhu i in.* [1997] donoszą również o wpływie rozdrobnienia i kruszenia ziaren ekspandowanej gliny na poziom sorpcji fosforu. Odnotowano, że keramzyt o owalnych i pełnych ziarnach posiadał zdolność wiązania fosforu równą 0,046 mg P/g, natomiast pokruszony i połamany ponad 3-krotnie wyższą na poziomie 0,162 mg P/g. *Zhu i in.* [1997] dodatkowo wykazali wpływ gęstości kruszywa keramzytowego na pojemność sorpcyjną. Analiza sorpcji fosforu przez pyliste materiały mineralne wykazuje z kolei porównywalność pyłu keramzytowego z kaolinem pylistym (0,656 mg P/g). Badania dowiodły, że pył keramzytowy wykazuje lepsze zdolności adsorpcyjne przy usuwaniu fosforu z roztworów wodnych niż diatomit (0,259 mg P/g) oraz zeolit, zarówno ziarnisty (0,056 mg P/g), jak i sproszkowany (0,084 mg P/g). Z kolei keramzyt pylisty

posiada mniejszą pojemność sorpcyjną aniżeli glinokrzemiany bądź popiół lotny. Mimo, że popioły lotne charakteryzują się wysoką pojemnością sorpcyjną fosforu na poziomie do 13,8 mg P/g to dodatkowo alkalizują środowisko wodne [*Mastoń, 2013*]. Analiza tematu wskazuje, że sorpcja fosforu przez pylisty keramzyt może intensyfikować biologiczne usuwanie fosforu ze ścieków w systemach z osadem czynnym.

Wnioski

Z analizy właściwości pyłu keramzytowego ($d < 200 \mu\text{m}$) wynika, że charakterystyka fizykochemiczna, przede wszystkim rozkład granulometryczny, gęstość, znaczna porowatość, powierzchnia właściwa oraz właściwości sorpcyjne względem fosforu wskazują na zasadność jego wykorzystania w technologii osadu czynnego oraz do usuwania fosforu ze ścieków. Pył keramzytowy jest materiałem mineralnym, lekko alkalicznym o pH 8,4, z którego nie następuje wymywanie substancji szkodliwych do środowiska wodnego.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały znaczącą zdolność sorpcyjną pylistego keramzytu. Maksymalna pojemność sorpcyjna pyłu keramzytowego wyznaczona eksperymentalnie kształtowała się na poziomie 0,593 mg P/g. Z kolei parametry otrzymanego modelu wyniosły: $q_m = 0,5952$ mg P/g oraz $K_L = 0,4283$.

LITERATURA

- Ádám K., Krogstad T., Vrǎle L., Søvik A.K., Jenssen P.D., 2007. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P® - Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. *Ecol. Eng.*, **27**, 200-208. DOI:10.1016/j.ecoleng.2006.09.021
- Cao S., Chen W., Jing Z., 2012. Phosphorus removal from wastewater by fly ash ceramsite in constructed wetland. *Afr. J. Biotechnol.*, **11**, 16, 3825-3831. DOI: 10.5897/AJB11.2719
- Mastoń A., 2013. *Wspomaganie technologii osadu czynnego pylistym keramzytem w sekwencyjnym reaktorze porcjowym*. Praca doktorska
- Mastoń A., Tomaszek J.A., 2010. Keramzyt w systemach oczyszczania ścieków. *Zesz. Nauk. P. Rzesz. Bud. i Inż. Środ.*, **271**, 57, 85-98
- Mastoń A., Tomaszek J.A., 2012. Kierunki zastosowania mineralnych materiałów pylistych w technologii osadu czynnego - studium literatury. *Pr. Nauk. Inż. Środ. - Wsp. probl. inż. i ochr. środ.*, **59**, 5-23
- Mastoń A., Tomaszek J.A., 2013. *Możliwości zastosowania pylistego keramzytu w aspekcie wspomaganie technologii osadu czynnego*. VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Postęp w Inżynierii Środowiska”. Polańczyk, 9-21 września 2013
- Mastoń A., Tomaszek J.A., Opalińska I., 2013. Badania nad poprawą właściwości sedymentacyjnych osadu czynnego przy zastosowaniu mineralnych substancji pylistych. *Gaz Woda Tech. Sanit.*, **12**, 490-495
- Park S.-J., Lee H.S., Yoon T.-I., 2002. The evaluation of enhanced nitrification by immobilized biofilm on a clinoptilolite carrier. *Biores. Technol.*, **82**, 183-189. DOI:10.1016/S0960-8524(01)00160-2.
- Wei Y.-X., Li Y.-F., Ye Z.-F., 2010. Enhancement of removal efficiency of ammonia nitrogen in sequencing batch reactor using natural zeolite. *Env. Earth Sci.*, **60**, 1407-1413. DOI: 10.1007/s12665-009-0276-1
- Wiszniewski J., Surmacz-Górska J., Robert D., Weber J.-V., 2007. The effect of landfill leachate composition on organics and nitrogen removal in an activated sludge system with bentonite additive. *J. Env. Manage.*, **85**, 59-68. DOI:10.1016/j.jenvman.2006.08.001.
- Zakład Produkcyjny Weber w Gniewie. *Saint-Gobain Construction Products Polska sp. z o.o.* (05.2015) <http://www.saint-gobain.pl/weber/>
- Zhu, T., Jenssen, P.D., Mæhlum, T., Krogstad, T., 1997. Phosphorus sorption and chemical characteristics of light-weight aggregates (LWA) - potential filter media in treatment wetlands. *Wat. Sci. Technol.*, **35**(5), 103-108. DOI:10.1016/S0273-1223(97)00058-9.

Praca wykonana w ramach projektu pn. „Podkarpacki fundusz stypendialny dla doktorantów” w latach 2011-2013 współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

W badaniach wykorzystano aparaturę zakupioną w ramach projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.