

Adam MASŁOŃ
Janusz A. TOMASZEK
Politechnika Rzeszowska

KERAMZYT W SYSTEMACH OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania kruszywa budowlanego – keramzytu, w technologii oczyszczania ścieków. Dokonano przeglądu literatury w zakresie badań laboratoryjnych oraz doświadczeń eksploatacyjnych wybranych systemów oczyszczania ścieków wykorzystujących kruszywo keramzytowe. Zastosowanie kruszywa keramzytowego w oczyszczaniu ścieków prowadzi do wykorzystania jego specyficznych właściwości porowatych, sorpcyjnych i termoizolacyjnych. Do tej pory glina ekspandowana znalazła zastosowanie jako nośnik biomas immobilizowanej w systemach z błoną biologiczną, jako materiał filtracyjny oraz sorbent fosforu i substancji organicznych. Analiza wykazała, że wykorzystanie keramzytu w tak szerokim zakresie w systemach oczyszczania ścieków czyni z niego niezwykle cenny materiał.

Słowa kluczowe: keramzyt, złożo hydrofitowe, błona biologiczna

1. Wstęp

Stosowane w budownictwie surowce, oprócz swojego zasadniczego przeznaczenia, mogą być również wykorzystywane w innych gałęziach gospodarki i przemysłu. Dodatkowo, intensywne poszukiwania substancji wspomagających i usprawniających oczyszczanie ścieków sprawiają, że doświadczenia i efekty nauk w budownictwie można skutecznie wykorzystać. W zależności od wymagań stawianych ściekom oczyszczonym, systemy oczyszczania ścieków są oparte na prostych bądź bardziej skomplikowanych technologiach. Zarówno w stopniu mechanicznego oczyszczania ścieków (np. filtracja), jak i biologicznego (układy z osadem czynnym, z błoną biologiczną, systemy beztlenowe itp.), zastosowanie mają pewne materiały i surowce mineralne, których celem jest wspomaganie i intensyfikacja procesów jednostkowych. Przykładem takim jest wykorzystanie kruszywa keramzytowego.

2. Charakterystyka i właściwości keramzytu

Keramzyt, nazywany również ekspandowaną gliną lub glińcem, jest sztucznym kruszywem budowlanym powstałym z surowców mineralnych poddanych obróbce termicznej (wg definicji normy [1]). Innymi, często stosowanymi nazwami tego kruszywa są akronimy angielskich nazw – LECA (*light expanded clay aggregate*) oraz LWA (*light-weight aggregates*).

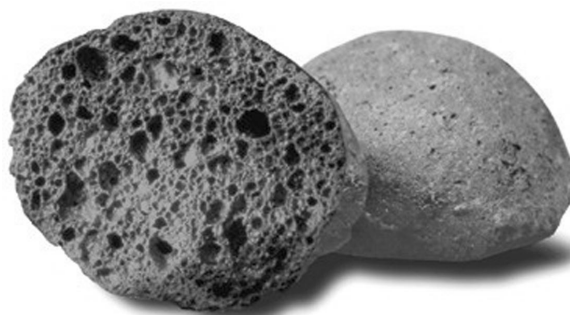
Początek produkcji keramzytu datuje się na rok 1913, jednakże właściwy rozwój produkcji materiałów keramzytowych nastąpił po drugiej wojnie światowej. W Polsce przemysłową produkcję keramzytu rozpoczęto w latach 60-tych ubiegłego wieku z surowców ilastych. Obecnie istnieją dwie wytwórnie keramzytu w Polsce, w Mszczonowie oraz w Gniewie. Gлина ilasta, stosowana do produkcji polskiego keramzytu jest wydobywana w kopalniach na Mazowszu i Pomorzu Gdańskim [2-4].

Keramzyt jest otrzymywany w wyniku pęcznienia (ekspandowania) łatwo topliwych glin i iłów w procesie wypalania [2, 5]. Wypalanie uformowanej do postaci granulatu i wstępnie podsuszanej gliny odbywa się w piecach obrotowych w temperaturze 1100-1300°C. W tym czasie granulaty czterokrotnie zwiększa swoją objętość i uzyskuje porowatą strukturę [6]. Ziarna powstającego kruszywa przyjmują kształt owalny, zbliżony do kuli, o wielkości, w zależności od produkowanej frakcji, maksymalnie do 20 mm (rys. 1.). Na ich powierzchni wytwarza się charakterystyczna spieczona ceramiczna powłoka koloru ceglastego lub brązowego, o grubości 0,5-1 mm (tzw. czerep spieczony), [2-4, 6].



Rys. 1. Keramzyt

Do produkcji keramzytu, oprócz materiału ilastego, mogą być stosowane dodatkowo substancje poprawiające pęcnienie i wypalanie całej struktury granulatu. Stosowane są oleje mineralne, węgiel brunatny, popiół ze spalania paliw kopalnych [6], odpady organiczne, np. szlamy z oczyszczalni ścieków rafineryjnych, zakładów tłuszczowych oraz komunalny osad ściekowy [7], a także popiół z osadów ściekowych [8, 9]. W temperaturze powyżej 1100°C glina (i/lub mieszanina gliny oraz substancji pomocniczych) stosowana do produkcji kruszywa zostaje pozbawiona ze swego składu wszelkich składników organicznych, dzięki czemu powstałe kruszywo staje się materiałem mineralnym [5]. Ziarna keramzytu mają równomiernie rozłożone drobne wewnętrzne zamknięte pory (w ilości ok. 70-90%), których średnica nie przekracza zazwyczaj 1.0-1.5 mm (rys. 2.). Często jednak występuje duża liczba porów otwartych wytworzonych w ceramicznej powłoce zewnętrznej lub na granicy czerep-wnętrze. Całkowita porowatość materiału keramzytowego dochodzi do 70-80%. Gęstość objętościowa keramzytu waha się od 900 do 1400 kg/m³. Ziarna keramzytu, w zależności od wymiarów, osiągają gęstość nasypową od 650 do 900 kg/m³ [2-4]. Mają rozwiniętą powierzchnię właściwą o wielkości 700-1500 m²/m³ [6].



Rys. 2. Ziarna keramzytu z widocznym czerepem spieczonym oraz wewnętrzną strukturą porowatą [4]

Keramzyt jest materiałem inertnym, obojętnym chemicznie. Skład chemiczny keramzytu jest uzależniony od pochodzenia i składu gliny ilastej, jak również składników strukturalnych. Przykładowy skład chemiczny ekspandowanej gliny przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny keramzytu [10]

| Składnik | Zawartość [%] |
|--------------------------------|---------------|
| SiO ₂ | 55,0 ± 5,0 |
| Al ₂ O ₃ | 24,0 ± 5,0 |
| Fe ₂ O ₃ | 14,0 ± 5,0 |
| CaO | 5,0 ± 5,0 |
| Chlorki | < 0,02 |
| Siarka ogółem | < 1,0 |

Nasiąkliwość keramzytu, określana na ok. 20% dla ziaren o największej średnicy, dotyczy tylko ich zewnętrznej powłoki. Keramzyt ma również dobre parametry termoz izolacyjne (współczynnik przewodzenia ciepła – 0,1 W/mK) oraz właściwości sorpcyjne. Do tej pory keramzyt znalazł zastosowanie przede wszystkim w budownictwie do produkcji lekkich betonów, zapraw ciepłochronnych, wyrobu pustaków stropowych i ściennych, jako materiał izolacyjny (izolacje cieplne) i do wykonywania drenaży. Używany jest także poza budownictwem, w takich dziedzinach, jak np.: geotechnika, radiestezja, ogrodnictwo (w tym hydroponika) [3, 4, 11-14]. W ostatnim czasie obserwuje się wzmożony rozwój systemów oczyszczania ścieków wykorzystujących keramzyt – ekspandowaną glinę lub materiały o zbliżonym składzie i porównywalnej charakterystyce.

3. Systemy oczyszczania ścieków z wykorzystaniem keramzytu

3.1. Systemy filtracyjne. Hydrofitowe oczyszczanie ścieków

Pierwsze badania nad wykorzystaniem keramzytu w technologii ścieków wynikały z poszukiwania materiału o dobrych właściwościach filtracyjnych. Keramzyt znalazł zastosowanie jako warstwa filtracyjna drenażu rozsączającego lub studni chłonnej w przydomowych i lokalnych systemach oczyszczania ścieków.

Na początku lat 90-tych ubiegłego wieku prace badawcze podjęte przez Jensena i innych wykazały dużą zdolność sorpcyjną ekspandowanej gliny (LECA) w stosunku do fosforu, na poziomie 4,0 kg P/rok·m³ (cyt. za [15]). Kolejne badania nad sorpcją fosforu przez keramzyt otworzyły drogę do jego zastosowania w hydrofitowych systemach oczyszczania ścieków *constructed wetland systems* [15-18]. W systemach hydrofitowych zanieczyszczenia są usuwane ze ścieków w wyniku procesów sorpcji zanieczyszczeń biochemicznych, reakcji utleniająco-redukujących oraz biologicznej aktywności mikroorganizmów – roślin wodnych i wodolubnych. Jednak skuteczność usuwania fosforu zależy również od rodzaju materiału filtracyjnego wypełniającego złożę oraz jego pojemności sorpcyjnej. Rośliny spełniają natomiast rolę pomocniczą w procesie oczyszczania, magazynując tymczasowo substancje organiczne i biogenne [19]. Ekspandowana glina może mieć zastosowanie w złożach hydrofitowych, zarówno z poziomym przepływem ścieków *horizontal flow constructed wetlands*, jak i pionowym *vertical flow constructed wetland* w systemach oczyszczania ścieków do 2000 RLM.

Z uwagi na duże powinowactwo związków fosforu względem Ca, Fe i Al zawartych w kruszywie, wysoką zdolność sorpcyjną keramzytu wyjaśniają dwa mechanizmy: współstrącanie fosforu z Ca (precypitacja) i sorpcja fosforu na powstałych tlenkach żelaza i glinu. Mechanizm dokładnego wiązania fosforu

w złożu keramzytowym może wyjaśnić frakcjonowanie fosforu i określenie jego frakcji Ca-P, Fe-P oraz Al-P [15, 20]. W zależności od układu hydrofitowego i jego obciążenia zdolność sorpcyjna złoża osiąga efektywność od 46,0 do 565,0 mg P/kg keramzytu [18], 650,0-730,0 mg P/kg keramzytu [20] oraz 0,29-0,55 kg P/m³ kruszywa [15].

Kombinacja cech keramzytu – struktury porowatej, wysokiej wodoprzepuszczalności oraz znacznej pojemności sorpcyjnej powoduje, że układy hydrofitowe z warstwą keramzytu cechuje nie tylko wysoka efektywność usuwania ze ścieków fosforu całkowitego, dochodząca do ponad 95%, lecz także azotu całkowitego, np. przez nityfikację i denityfikację [17, 20]. W układzie jednostopniowego złoża hydrofitowego z wypełnieniem keramzytowym uzyskano usuwanie BZT₅, Nog i Pog, na poziomie odpowiednio: 93,0, 48,0 i 98,0%, natomiast w układzie złoża dwustopniowego efektywność zmieniła się nieznacznie, analogicznie 85,0, 59,0 i 95,0% [17]. Usuwanie związków biogenych prowadzili również Öövel i inni [21]. W zakresie oczyszczania ścieków komunalnych badacze osiągnęli 89% usunięcie fosforu całkowitego oraz 63% azotu całkowitego, w tym 77% nityfikację. Badania wykazały, że efektywność systemu hydrofitowego można z łatwością zintensyfikować poprzez zastosowanie w złożu sorbentów jonów fosforanowych – keramzytu [21]. Ekspandowana glina wykazuje również wysoką sorpcję nierozkładalnych substancji organicznych w złożach hydrofitowych. Dordio i inni [22] testowali sepiolit, wermikulit i LECA do usuwania ze ścieków trzech związków farmaceutycznych (kwas klofibrowy, carbamazepine, ibuprofen). Tylko wermikulit charakteryzował się wyższą zdolnością sorpcyjną, odpowiednio 0,025 mg/g i 0,015 mg/g kruszywa.

Modyfikacja składu ekspandowanej gliny pozwala uzyskać kruszywo o jeszcze wyższej pojemności sorpcyjnej i lepszych właściwościach filtracyjnych. Wzbogacanie gliny o mikroskładniki Ca, Fe, lub Al na etapie produkcji pozwala dostosować gotowy produkt do wymagań technologicznych złoża hydrofitowego (np. obciążenia). Przykładem może być kruszywo o handlowej nazwie Filtralite P[®] produkowane w Norwegii o składzie 7 g Mg/kg, 31 g Ca/kg, 5,7 g Fe/kg i 20 g Al/kg, posiadające gęstość właściwą 550 kg/m³ oraz porowatość 40% [23, 24]. Przeprowadzone badania w skali laboratoryjnej i półtechnicznej wykazały jego pojemność sorpcyjną od 250 do 4500 mg P/kg, która była niższa tylko od piasku muszlowego, który w składzie zawierał 300 g Ca/kg kruszywa [25-28].

Z uwagi na niską przewodność ciepła, warstwa ekspandowanej gliny utrzymuje temperaturę w złożu hydrofitowym przy niskich temperaturach, co pozwala wykorzystywać ją w zimnym klimacie, np. w Skandynawii. Złoże z keramzytem ma lepsze warunki hydrauliczne dla przepływu ścieków w porównaniu z systemami z wypełnieniem piaskowym lub żwirowym. Ponadto keramzytowe złoże hydrofitowe jest odporniejsze na kolmatację [16, 18].

3.2. Systemy z błoną biologiczną

Ze względu na wysoką porowatość, kruszywo keramzytowe okazało się dobrym nośnikiem biomasy immobilizowanej w systemach z błoną biologiczną. Materiały porowate jako nośniki biomasy zapewniają dużą powierzchnię podłoża mikrobiologicznego oraz poprawiają dyfuzję substratów do wnętrza biofilmu, przez co zwiększają jego efektywność [29]. García-Calderón i inni [30] wykazali, że cząsteczki kruszywa porowatego (perlitu) posiadające nieregularną powierzchnię z ostrymi krawędziami i szczelinami determinują przytwierdzenie i rozwój mikroorganizmów. Ponadto mikroorganizmy najlepiej rozwijają się w szczelinach i pęknięciach, ponieważ nieregularności kształtu chronią je przed siłami ścinającymi w reaktorze [30].

Keramzyt może być stosowany jako wypełnienie złoż biologicznych [31-33], filtrów biologicznych (biofiltrów), [34, 35], a także reaktorów ze złożem fluidalnym [36, 37] i zawieszonym/ruchomym [38, 39]. Stosowany jest zarówno w układach tlenowych [34, 35], jak i beztlenowych [37].

Badania wykazały możliwość zastosowania ziaren keramzytu jako podłoża błony biologicznej do prowadzenia procesu nityfikacji azotu amonowego. W laboratoryjnym nityfikacyjnym złożu biologicznym Lekang i Kleppe [32] zastosowali cztery rodzaje wypełnienia: keramzyt o uziarnieniu 2-4, 2-7 i 4-10 mm oraz kształtki KMT Kaldnes®, Norton® i tworzywo sztuczne Finturf (stos. do produkcji sztucznej trawy). Najszybciej, już po 7-8 tygodniach od wpracowania, osiągnięto pełną nityfikację w układzie z keramzytem. Spośród wszystkich materiałów tylko keramzyt umożliwił uzyskanie 100% nityfikacji. W pozostałych przypadkach poziom nityfikacji wyniósł odpowiednio: 79, 57 i 36%. Autorzy uzasadnili również, że zarówno wielkość ziaren ekspandowanej gliny, jak również czas przepływu nie warunkują szybkości nityfikacji dla tego kruszywa [32]. W technologii IBMER zastosowano keramzytowe złoż biologiczne w celu mineralizacji związków organicznych i nityfikacji azotu amonowego. Analiza technologii w skali półtechnicznej wykazała wysoką skuteczność złoża wstępnego w obniżeniu wskaźników zanieczyszczeń BZT₅ (74,3-88,6%) i ChZT (80,4-83,8%), a także efektywną nityfikację na poziomie 73,8-91,7% [33]. Keramzyt z powodzeniem jest stosowany również jako wypełnienie złoż biologicznych, nie tylko w małych systemach oczyszczania ścieków. Przykładem może być stosowanie ekspandowanej gliny Liaperl® do prowadzenia nityfikacji i denityfikacji w systemach >10000 RLM [10]. Za jego stosowaniem przemawia niska cena, konkurencyjna w stosunku do kształtek i pakietów z tworzyw sztucznych [40]. W przydomowych systemach oczyszczania ścieków stosowany jest często wstępny osadnik gnilny, zawierający na odpływie wewnętrzne złożo wypełnione keramzytem [41-43].

Zastosowanie ekspandowanej gliny w celu nityfikacji testowali również Fan i inni [36] w innowacyjnym systemie *rotation-cage-type suspended carrier bioreactor*, łączącym cechy złoża obrotowego i złoża fluidalnego. Ziarna keram-

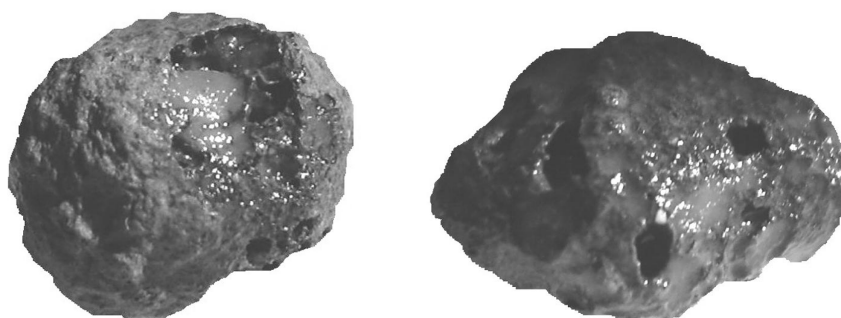
zytu o wielkości 8-16 mm zostały „unieruchomione” w obrotowym bębnie reaktora, który pracował jak złoże obrotowe. Całkowita ilość kruszywa wyniosła 50% objętości bębna, dzięki czemu ziarna keramzytu znajdowały się w stanie zawieszonym w czasie pracy reaktora. Wstępne badania systemu wykazały 75,3% usuwanie ChZT oraz 89,0% usunięcie azotu amonowego w procesie nityfikacji ścieków o niskim stężeniu zanieczyszczeń.

Wang i inni [34] badali możliwość zastosowania kruszonej lawy wulkanicznej i ekspandowanej gliny w tlenowym biofiltrze BAF (*Biological Aerated Filter*). Układ analizowano w zakresie obciążenia hydraulicznego 9,17-22,0 m³/m² · d. Pomimo że analizowane materiały charakteryzowały się podobnymi właściwościami fizycznymi, niewiele wyższą skuteczność wykazał układ z lawą jako wypełnieniem. Uzyskano obniżenie ChZT, niezależne od obciążenia, na poziomie do 80,6 i 83,3% – odpowiednio dla keramzytu i lawy wulkanicznej. Usuwanie azotu amonowego kształtowało się na niskim poziomie 30-45% i limitowane było niską nityfikacją [34].

O dobrych warunkach sprzyjających wzrostowi na powierzchni ziaren keramzytu specyficznych grup mikroorganizmów świadczą również ostatnie doniesienia. Bajaj i inni [35] wykazali wysoką zdolność biodegradacji fenolu złoża biologicznego wytworzonego na powierzchni ekspandowanej gliny Liapor[®]. Natomiast Amorim i inni [37] dowiedli, że spieczona glina jest idealnym nośnikiem biomasy w procesach fermentacji przy krótkim czasie retencji.

Istota technologii złoża ruchomego *moving bed* polega na zastosowaniu jako nośnika błony biologicznej swobodnie pływających elementów o rozwiniętej powierzchni właściwej. Kluczowym czynnikiem dla prawidłowego i stabilnego rozwoju mikroorganizmów biofilmu w technologii złoża ruchomego jest podłoże, które powinno zapewniać odpowiednią powierzchnię kontaktu mikroorganizmów z usuwanymi ze ścieków substancjami, a także gęstość stosowanych materiałów. Istnieją doniesienia literatury, że oprócz klasycznych kształtek z tworzyw sztucznych możliwe jest zastosowanie porowatych mineralnych nośników błony biologicznej [44]. Jedno z pierwszych doświadczeń nad wykorzystaniem ekspandowanej gliny (Liapor[®]), jako nośnika złoża ruchomego w systemie MBSBBR (*Moving Bed Sequencing Batch Biofilm Reactor*), wykazało porównywalną efektywność biologicznego usuwania azotu w odniesieniu do komercyjnych nośników KMT Kaldnes[®] i Linpor[®] [38]. Układ z nośnikiem Liapor[®] wykazał znaczny potencjał usuwania związków organicznych i azotu amonowego przy niskim obciążeniu ładunkiem ChZT (< 2,5 g ChZT/m² · d), [38]. Z kolei inne badania wykazały do 90% efektywność obniżenia ChZT wysoko stężonych (3,5 g ChZT/dm³ w dopływie) ścieków zawierających aminy aromatyczne [39]. Delnavaz i inni dowiedli, że wytworzona na ekspandowanej glinie błona biologiczna pozwala usunąć ze ścieków trudno rozkładalne związki organiczne, np. aminy aromatyczne – anilinę, p-aminofenol i p-diaminobenzen [39].

W badaniach własnych autorzy zastosowali polski keramzyt o średnicy 4-8 mm jako nośnik złoża ruchomego w sekwencyjnym reaktorze porcjowym PCMBSBBR (*Porous Carrier in Moving Bed Sequencing Batch Biofilm Reactor*) [45]. Uzyskano wysoką efektywność usuwania związków organicznych, związków azotu i fosforu, odpowiednio powyżej 99, 92 i 97% dla obciążenia reaktora ładunkiem 0,432-0,972 g ChZT/dm³ · d. W badaniach zaobserwowano usuwanie azotu na drodze nitryfikacji i denitryfikacji oraz efektywną biologiczną defosfatację. Osiągnięto stabilną nitryfikację azotu amonowego na poziomie do 99%. Analizowana technologia wykazała porównywalne efekty oczyszczania ścieków w odniesieniu do systemów MBSBBR z klasycznymi, tworzywowymi nośnikami złoża ruchomego [44]. W czasie realizacji badań autorzy zaobserwowali jednak, że tworzenie biofilmu na ziarnach keramzytu następowało stosunkowo wolno (ok. 6 tygodni) i mogło wynikać z obecności substancji toksycznych (np. metali ciężkich) zawartych w kruszywie. Z tego względu przy zastosowaniu keramzytu jako nośnika biomasy, istotny jest skład chemiczny keramzytu oraz pochodzenie materiałów kompozytowych, w tym gliny, stosowanych do produkcji kruszywa. Zaobserwowano, że błona biologiczna została wykształcona nierównomiernie, zarówno w otwartych jak i zamkniętych, wewnętrznych porach ziaren keramzytu (rys. 3.). Nie wyklucza się, że na nieregularne pokrycie ziaren błoną biologiczną wpływ również miały warunki hydrauliczne układu i związane z tym zbyt duże siły ścinające.



Rys. 3. Wytworzona błona biologiczna na ziarnach keramzytu w systemie PCMBSBBR

W okresie badań odnotowano niski indeks objętościowy osadu czynnego (do 100,8 cm³/g) spowodowany wbudowywaniem w strukturę kłaczków osadu mikrocząstek keramzytu. Powstałe w wyniku ścierania keramzytu mikrocząsteczki były wbudowywane w strukturę osadu czynnego i odprowadzane z układu wraz z osadem nadmiernym. Skutkiem tego było zwiększenie gęstości osadu i prędkości sedimentacji. Przypuszcza się, że na powierzchni powstałych mikroziaren keramzytu oraz w ich mikroporach również były immobilizowane mikroorganizmy biorące udział w przemianach biochemicznych. Anielak [46]

wykazała, że w mikroziarnach zeolitu naturalnego (o granulacji $< 250 \mu\text{m}$) pory i kanaliki tworzą warunki sprzyjające rozwojowi mikroorganizmów. Poza tym mikrocząstki zeolitu zapewniają dużą powierzchnię podłoża mikrobiologicznego, tworząc z osadem czynnym biofilm [46]. Dodatkowo część ziaren keramzytu w wyniku znacznej nasiąkliwości ulegała „trwałej sedimentacji”, wykluczając się jako nośniki błony biologicznej. Zaobserwowany „ubytek” nośników błony biologicznej okazał się jednak mankamentem technologii.

Zaobserwowana obecność mikrocząsteczek keramzytu w osadzie czynnym może mieć jednak korzystny wpływ zarówno na parametry technologiczne osadu, jak też na prowadzenie i intensyfikowanie jednostkowych procesów biologicznego oczyszczania (np. nitrifikacji czy biologicznej defosfatacji), porównywalnie z dawkowaniem pylistych substancji mineralnych, jak np. zeolitu naturalnego [46-51], bentonitu [52], talku [53, 54], węgla aktywnego [48] lub lotnych popiołów paleniskowych [55]. Substancje pyliste, ingerując w charakterystykę osadu czynnego, mogą wpływać na sprawność biologicznego oczyszczania ścieków. Najefektywniejszym przykładem zastosowania pylistej formy substancji mineralnej w oczyszczaniu ścieków z osadem czynnym jest zeolit naturalny. Badania przydatności pylistego zeolitu wykazały szereg zalet (m.in. brak pęcznienia i wypływania osadu oraz pienienia się ścieków [46], poprawa właściwości sedimentacyjnych osadu czynnego, zwarta struktura kłaczek osadu, doskonałe podłoże do rozwoju autotroficznych bakterii nitrifikacyjnych [50, 56], możliwość uzyskania symultanicznej nitrifikacji/denitrifikacji [51]), dzięki czemu znalazł zastosowanie w skali technicznej [57, 58].

4. Podsumowanie

Zastosowanie kruszywa keramzytowego w oczyszczaniu ścieków prowadzi do wykorzystania jego specyficznych właściwości porowatych, sorpcyjnych i termoizolacyjnych. Do tej pory glina ekspandowana znalazła zastosowanie jako nośnik biomasy immobilizowanej w systemach z błoną biologiczną, jako materiał filtracyjny oraz sorbent fosforu i substancji organicznych. Analiza wykazała, że wykorzystanie keramzytu w tak szerokim zakresie w systemach oczyszczania ścieków czyni z niego niezwykle cenny materiał. Zaprezentowane w pracy wyniki dotychczasowych badań nad jego przydatnością wykazują duży potencjał jego wykorzystania w celu poprawy i intensyfikacji procesów oczyszczania ścieków.

Usuwanie fosforu ze ścieków w systemach hydrofitowych jest limitowane pojemnością sorpcyjną materiału stanowiącego wypełnienie złoża. Keramzyt staje się alternatywnym surowcem w stosunku do obecnie stosowanych materiałów z uwagi na dużą zawartość Ca, Al i Fe, przez co ma znacznie większą zdolność wiązania fosforu od piasku i/lub żwiru, wydłużając okres eksploatacji złoża

hydrofitowego. Ponadto keramzytowe złożo hydrofitowe może dodatkowo sorbować trudno rozkładalne związki organiczne.

Doświadczenia w zakresie wykorzystania gliny ekspandowanej jako podłoża błony biologicznej wykazały, że dzięki swoim wyjątkowym właściwościom fizycznym (wysoka porowatość i duża powierzchnia właściwa, sorpcja fosforu) ekspandowana glina może być konkurencyjnym nośnikiem w systemach z biofilmem wobec klasycznych kształtek z tworzyw sztucznych (Kaldnes®, Linpor®, EvU-Perl® itp.), które stanowią wyłącznie powierzchnię kontaktową dla wzrostu mikroorganizmów. Struktura komórkowa ziaren keramzytu może przyczynić się do wytworzenia specyficznych warunków dla rozwoju mikroorganizmów błony biologicznej. Na porowatym nośniku może zostać wykształcony biochemiczny wysokoefektywny biofilm. Dodatkowo, ziarno keramzytu może wówczas łączyć cechy podłoża biomasy i sorbentu zanieczyszczeń. Wykształcona na ziarnach keramzytu błona biologiczna pozwala również usunąć ze ścieków trudno rozkładalne związki organiczne, np. aminy aromatyczne lub fenol. Nietypowe właściwości keramzytu powodują, że wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem keramzytu jako nośnika błony biologicznej w systemach ze złożem ruchomym. Świadczą o tym nowe rozwiązania technologiczne, np. technologia PCMBSBBR. Jednak wadą kruszywa, w przypadku jego wykorzystania jako nośnika złoża ruchomego, jest zbyt niska wytrzymałość mechaniczna oraz znaczna nasiąkliwość.

Z uwagi na niski współczynnik przewodnictwa cieplnego keramzyt ma bardzo dobre właściwości izolacyjne, w związku z czym może stabilizować temperaturę i akumulować ciepło zarówno w układach hydrofitowych, jak i systemach z błoną biologiczną. Porowate ziarna nośnika błony biologicznej, utrzymując stałą temperaturę, mogą stanowić lepsze podłoże do rozwoju mikroorganizmów aniżeli klasyczne kształtki tworzywowe.

Analiza piśmiennictwa skłania do rozważania zastosowania keramzytu w wybranych układach technologicznych oczyszczania ścieków zarówno w celu poprawy efektywności, jak również wysunięcia wniosków dotyczących kierunku dalszych badań. Należy przeprowadzić badania nad toksycznością kruszywa keramzytowego w systemach z błoną biologiczną i/lub potencjalnym wymywaniem metali ciężkich z kruszywa stosowanego jako nośnik biofilmu. Nowym kierunkiem badań powinno być także określenie przydatności pylistej formy keramzytu do poprawy biologicznego oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego. Przedstawione przez autorów pracy badania systemu PCMBSBBR wykazały, że obecność mikrocząstek keramzytu w kłaczkach osadu czynnego może wpływać korzystnie na procesy biologicznego oczyszczania ścieków, podobnie jak dawkovanie pylistego zeolitu naturalnego, bentonitu itp. Dodatkowo wskazane jest również określenie mechanizmu sorpcji fosforu przez keramzyt. Możliwe jest to dzięki procedurom frakcjonowania fosforu, np. metodą Psennera, Wiliamsa lub SMT (*Standards, Measurements and Testing*), [59, 60].

Bibliografia

- [1] Norma PN-86/B-23006. Kruszywa do betonu lekkiego.
- [2] Osiecka E.: Materiały budowlane: spoiwa mineralne, kruszywa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 2005.
- [3] Materiały informacyjne firmy Keramzyt. Przedsiębiorstwo Kruszyw Lekkich w Mszczonowie, 2009.
- [4] Materiały informacyjne firmy Maxit. Zakład Produkcji Keramzytu, 2009.
- [5] Piasta J., Piasta W.: Rodzaje i znaczenie kruszywa w betonie. XVII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”. 20-23 lutego 2002 r., Ustroń.
- [6] Chandra S., Berntsson L.: Lightweight aggregate concrete: Science, Technology, and Applications. Norwich, New York, USA: William Andrew Publishing, 2002.
- [7] Latosińska J., Żygadło M.: Modyfikacja cech kruszywa keramzytowego odpadowym dodatkiem surowcowym. *Ceramika/Ceramics*, 91/2, 2005, 1283-1290.
- [8] Lin D.F., Weng C.H.: Use of sewage sludge ash as brick material. *Journal of Environmental Engineering*, 10, 2001, 922-927.
- [9] Chiou I.-J., Wang K.-S., Chen C.-H., Lin Y.-T.: Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. *Waste Management*, 26, 2006, 1453-1461.
- [10] Materiały informacyjne firmy Cleanswater, 2009.
- [11] Dobrowolski A.: Lekkie kruszywo keramzytowe w zastosowaniach geotechnicznych. *Materiały Budowlane*, 1, 2002, 106-107.
- [12] Sawicki J.: Keramzyt w konstrukcjach budowlanych. *Izolacje*, 1, 2005, 51-54.
- [13] Sawicki J.: Keramzyt od fundamentów aż po dach. *Izolacje*, 3, 2007, 46-50.
- [14] Sawicki J.: Keramzytowe elementy murowe. *Izolacje*, 4, 2007, 96-99.
- [15] Johansson L.: The use of LECA (light expanded clay aggregates) for the removal of phosphorus from wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, 35(5), 1997, 87-93.
- [16] Jenssen P.D., Mæhlum T., Krogstad T.: Potential use of constructed wetlands for wastewater in northern environments. *Wat. Sci. Tech.*, 28(10), 1993, 149-157.
- [17] Mæhlum T., Jenssen P.D., Warner W.S.: Cold-climate constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 32(3), 1995, 95-101.
- [18] Zhu, T., Jenssen, P.D., Mæhlum, T., Krogstad, T.: Phosphorus sorption and chemical characteristics of light-weight aggregates (LWA) – potential filter media in treatment wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 35(5), 1997, 103-108.
- [19] Obarska-Pempkowiak H.: Oczyszczalnie hydrofitowe. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2002, 214.
- [20] Drizo A., Frost C.A., Grace J., Smith K.A.: Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems. *Wat. Res.*, 33(17), 1999, 3595-3602.
- [21] Öövel M., Tooming A., Mäuring T., Mander Ü.: Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia. *Ecological Engineering*, 29, 2007, 17-26.
- [22] Dordio A.V., Estêvão Candeias A.J., Pinto A.P., Teixeira da Costa C., Palace Carvalho A.J.: Preliminary media screening for application in the removal of clofibric acid, carbamazepine and ibuprofen by SSF-constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35, 2009, 290-302.

- [23] Suliman F., French H.K., Haugen L.E., Søvik A.K.: Change in flow and transport patterns in horizontal subsurface constructed wetlands as a result of biological growth. *Ecological Engineering*, 27, 2006, 124-133.
- [24] Ádám K., Krogstad T., Vråle L., Søvik A.K., Jenssen P.D.: Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P® – Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. *Ecological Engineering*, 27, 2007, 200-208.
- [25] Ádám K., Krogstad T., Suliman F.R.D., Jenssen P.D.: Phosphorous Sorption by Filtralite P-Small Scale Box Experiment. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(6-7), 2005, 1239-1250.
- [26] Ádám K., Søvik A.K., Krogstad T.: Sorption of phosphorus to Filtralite P® – The effect of different scales. *Wat. Res.*, 40, 2006, 1143-1154.
- [27] Ádám K., Søvik A.K., Krogstad T., Heistad A.: Phosphorus removal by the filter materials light-weight aggregates and shellsand – a review of processes and experimental set-ups for improved design of filter systems for wastewater treatment. *VATTEN*, 63, 2007, 245-257.
- [28] Johansson Westholm L.: Substrates for phosphorus removal – Potential benefits for on-site wastewater treatment? *Wat. Res.*, 40, 2006, 23-26.
- [29] Cho B-C., Chang C-N., Liaw S-L., Huang P-T.: The feasible sequential control strategy of treating high strenght organic nitrogen wastewater with sequencing batch biofilm reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 43(3), 2001, 115-122.
- [30] García-Calderón D., Buffière P., Moletta R., Elmaleh S.: Anaerobic digestion of wine distillery wastewater in down-flow fluidized bed. *Wat. Res.*, 32(12), 1998, 593-3600.
- [31] Norma PN-92/B-06717. Wypełnienia złóż biologicznych z kruszyw mineralnych i sztucznych do oczyszczania ścieków.
- [32] Lekang O.-I., Kleppe H.: Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering*, 21, 2000, 181-199.
- [33] Jucherski A.: Ocena jakości oczyszczania ścieków bytowych w quasi-technicznej instalacji zagrodowej typu IBMER na terenach górzystych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2, 2007, 51-59.
- [34] Wang C., Li J., Wang B., Zhang G.: Development of an empirical model for domestic wastewater treatment by biological aerated filter. *Process Biochemistry*, 41, 2006, 778-782.
- [35] Bajaj M., Gallert C., Winter J.: Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. *Bioresource Technology*, 99, 2008, 8376-8381.
- [36] Fan J., Weiping C., Tao Z.: An Experimental Study on the Treating River Sewage with New Bioreactor. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 5(1), 2007, 33-38.
- [37] Amorim E.L.C., Barros A.R., Zamariolli Damianovic M.H.R., Silva E.L.: Anaerobic fluidized bed reactor with expanded clay as support for hydrogen production through dark fermentation of glucose. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 2009, 783-790.
- [38] Valvidia A., González-Martínez S., Wilderer P.A.: Biological nitrogen removal with three different SBBR. *Wat. Sci. Tech.*, 55(7), 2007, 245-254.

- [39] Delnavaz M., Ayati B., Ganjidoust H.: Biodegradation of aromatic amine compounds using moving bed biofilm reactors. *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 5(4), 2008, 243-250.
- [40] Materiały informacyjne firmy Wobet-Hydret, 2009.
- [41] Materiały informacyjne firmy Navotech Inżynieria Środowiska, 2009.
- [42] Materiały informacyjne firmy Sotralentz, 2009.
- [43] Materiały informacyjne firmy Zewita Warszawa, 2009.
- [44] Masłoń A., Tomaszek J.A.: Przegląd literatury nowych rozwiązań technologicznych reaktorów sekwencyjnych z błoną biologiczną. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska* z. 56, 2009, 67-85.
- [45] Masłoń A., Tomaszek J.A.: Oczyszczanie ścieków w sekwencyjnym reaktorze porcjowym ze złożem ruchomym z porowatym nośnikiem biomasy. Seminarium Naukowe „Oczyszczanie ścieków komunalnych – nowe kierunki badań”. Politechnika Warszawska, Warszawa, 30 czerwca 2009 r.
- [46] Anielak A.M.: Modyfikowane zeolity w inżynierii środowiska. *Ekotechnika*, 4, 2005, 12-15.
- [47] Son D.H., Kim D.W., Chung Y.-C.: Biological nitrogen removal using a modified oxic/anoxic reactor with zeolite circulation. *Biotechnology Letters*, 22, 2000, 35-38.
- [48] Park S.-J., Oh J.-W., Yoon T.-I.: The role of powdered zeolite and activated carbon carriers on nitrification in activated sludge with inhibitory materials. *Process Biochemistry*, 39, 2003, 211-219.
- [49] Anielak A.M.: Niekonwencjonalne metody usuwania substancji biogenych w bioreaktorach sekwencyjnych. *GWITS*, 2, 2006, 23-27.
- [50] Anielak A.M., Piaskowski K.: Influence of Zeolites on Kinetics and Effectiveness of the Process of sewage Biological purification in Sequencing Batch Reactors. *Environmental Protection Engineering*, 2, 11, 2005.
- [51] He S.B., Xue G., Kong H.N., Li X.: Improving the performance of sequencing batch reactor (SBR) by the addition of zeolite powder. *J. Hazard. Mater.*, 142(1-2), 2007, 493-499.
- [52] Lee H.S., Park S.J., Yoon T.I.: Wastewater treatment in a hybrid biological reactor using powdered minerals: effects of organic loading rates on COD removal and nitrification. *Process Biochem.*, 38, 2002, 81-88.
- [53] Cantet J., Paul E., Clauss F.: Upgrading performance of an activated sludge process through addition of talqueous powder. *Wat. Sci. Tech.*, 34(5-6), 1996, 75-83.
- [54] Clauss F., Balavoine C., Hélaine D., Martin G.: Controlling the settling of activated sludge in pulp and paper wastewater treatment plants. *Wat. Sci. Tech.*, 40(11-12), 1999, 223-229.
- [55] Kaczmarek K., Wielkopolski W., Mazur K., Sieńczyk M., Witka J.: Popioły lotne w oczyszczalni ścieków komunalnych. *Przegląd Komunalny*, 5, 2006, 44-46.
- [56] Piaskowski K., Anielak A.M.: Wpływ na osad czynny zeolitu naturalnego oraz modyfikowanego. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 7(1), 2004, 39-53.
- [57] Anielak A.M., Smarzyńska M.: Oczyszczanie ścieków zeolitami naturalnymi w systemie SBR na oczyszczalni ścieków w Krokowej. *GWITS*, 5, 2007, 30-35.
- [58] Anielak A.M., Wojnicz M., Piaskowski K.: Ocena skuteczności zastosowania zeolitów w oczyszczaniu ścieków komunalnych. Seminarium Naukowe „Oczyszczanie

- nie ścieków komunalnych – nowe kierunki badań”. Politechnika Warszawska, Warszawa, 30 czerwca 2009 r.
- [59] Gonzáles Medeiros J.J., Pérez Cid B., Fernández Gómez E.: Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples. *Anal. Bioanal. Chem.*, 381, 2005, 873-878.
- [60] Bartoszek L.: Wydzielanie fosforu z osadów dennych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 240, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 42, 2007, 5-19.

USE OF THE KERAMSITE IN WASTEWATER TREATMENT

S u m m a r y

In this paper an use of the keramsite in wastewater treatment was presented. A literature review of laboratory and technical-scale studies of selected wastewater treatment systems using keramsite was demonstrated. Use of the keramsite in wastewater treatment result from its specific porous, sorptive and thermo-insulating characteristics. So far the expanded clay as a carrier in the biofilm systems, a filter material and a sorbent of phosphorus and organic compounds was used. The use of keramsite in so wide range make it to extremely valuable material.

Keywords: keramsite, light expanded clay aggregate, constructed wetland systems, biofilm

Złożono w redakcji we wrześniu 2009 r.