

Joanna CZARNOTA¹
Janusz A. TOMASZEK²
Małgorzata MIĄSIK³
Monika ZDEB⁴

TLENOWY OSAD GRANULOWANY – CHARAKTERYSTYKA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA PROCES GRANULACJI W SEKWENCYJNYCH REAKTORACH PORCJOWYCH

Podczas konferencji „1st IWA - Workshop Aerobic Granular Sludge”, która odbyła się w Monachium w 2005 r., tlenowy osad granulowany zdefiniowano jako agregaty pochodzenia mikrobiologicznego, które nie koagulują w wyniku zmniejszenia siły hydrodynamicznej ścinania oraz sedymentujące znacznie szybciej niż kłaczkowy osad. Systemy GSBR mają wiele zalet wynikających z właściwości granul, które charakteryzują się dobrymi właściwościami sedymentacyjnymi, długim czasem retencji oraz nie wykazują pęcznienia. Dotychczasowe badania wykazały, że na proces tlenowej granulacji głównie wpływa: konfiguracja reaktora, środowisko i warunki jego pracy. Formowanie tlenowych granul jest procesem złożonym i kontrolowanym przez kilka czynników, z wyjątkiem konfiguracji reaktora, są to: warunki „uczta-głód”, kompozycja pożywki, obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń oraz siły hydrodynamiczne.

W pracy przedstawiono wyniki badań oraz charakterystykę czynników wpływających na proces granulacji w sekwencyjnych reaktorach porcjowych GSBR (*Granular Sequencing Batch Reactor*). Na podstawie literatury dobrano optymalne dla procesu granulacji wartości współczynnika dekantacji, prędkości przepływu powietrza oraz ilości tlenu rozpuszczonego, co umożliwiło zbadanie wpływ stosunku wysokości do szerokości reaktora (H/D – height/diameter) na proces granulacji tlenowego osadu czynnego. Zastosowane parametry technologiczne pracy reaktorów umożliwiły proces granulacji tlenowego osadu czynnego, a struktura granul pozwoliła uzyskać wyższe stężenie biomasy w reaktorach.

¹ Autor do korespondencji: Joanna Czarnota, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 19 64, askalucz@prz.edu.pl

² Janusz A. Tomaszek, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 13 61, tomaszek@prz.edu.pl

³ Małgorzata Miąsik, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 19 64, msutyla@prz.edu.pl

⁴ Monika Zdeb, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 19 49, mzdeb@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: granulowany tlenowy osad czynny, reaktor GSB, konstrukcja reaktora.

1. Wprowadzenie

Tlenowy osad granulowany klasyfikowany jest jako konsorcjum samo-unieruchomionych mikroorganizmów, składające się głównie z tlenowych i fakultatywnych bakterii [6]. Na pierwszej sesji poświęconej granulowanemu osadowi tlenowemu, która odbyła się w Niemczech w 2005 roku, tlenowy osad granulowany zdefiniowano jako agregaty pochodzenia mikrobiologicznego, które nie koagulują w wyniku zmniejszenia siły hydrodynamicznej ścinania oraz sedymentujące znacznie szybciej niż kłaczkowy osad czynny [4].

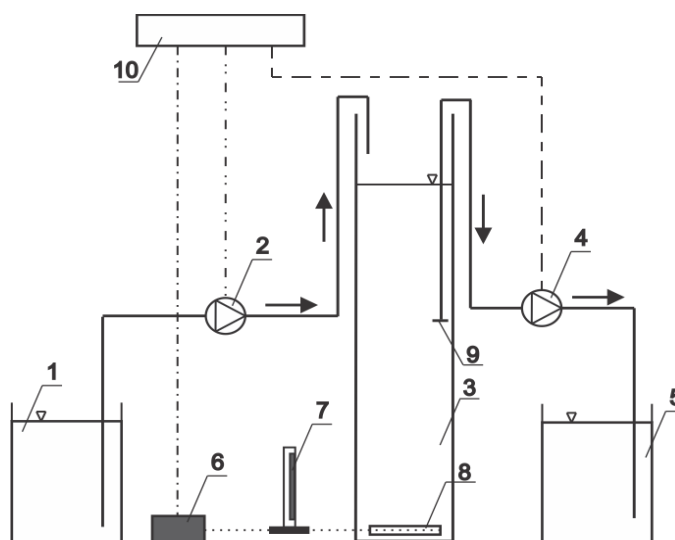
Dotychczasowe badania, przeprowadzone w zagranicznych i krajowych ośrodkach badawczych, w zakresie formowania tlenowego osadu granulowanego i efektywności oczyszczania ścieków w tej technologii, wykazały, że na proces tlenowej granulacji wpływają następujące parametry: ziarna osadu, skład ścieków, konstrukcja reaktora, jak również odpowiednia jego eksploatacja m.in. cykliczne zasilanie ściekami, głodzenie granul osadu, czas sedymentacji, zapewnienie burzliwego przepływu cieczy w reaktorze oraz utrzymanie wysokiego obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń organicznych [13, 15, 19]. W niniejszym opracowaniu podjęto próbę określenia wpływu stosunku wysokości do szerokości reaktora (H/D – height/diameter) na proces granulacji tlenowego osadu czynnego w sekwencyjnych reaktorach porcjowych GSB (*Granular Sequencing Batch Reactor*). Na podstawie literatury dobrano optymalne dla procesu granulacji wartości współczynnika dekantacji, prędkości przepływu powietrza oraz ilości tlenu rozpuszczonego.

2. Metodyka badań

Badania nad procesem tlenowej granulacji przeprowadzono w skali laboratoryjnej. Przygotowano dwa reaktory kolumnowe typu SBR, wykonane z polimetakrylanu metylu w kształcie walca. Średnice wewnętrzne reaktorów wynosiły odpowiednio: $D_{R1} = 0,07$ m, $D_{R2} = 0,1$ m, natomiast całkowita wysokość reaktorów (H) wynosiła 1,2 m. Takie parametry zapewniały wysoki stosunek H/D . Objętość czynna reaktorów wynosiła odpowiednio: $V_{R1} = 3,0$ dm³, $V_{R2} = 6,0$ dm³. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.

Na dobową pracę układu składało się 6 cykli, z których każdy trwał 4 godziny i obejmował fazy: doprowadzenia ścieków (15 min), reakcji (205 min), sedymentacji (5 min), odprowadzenia ścieków (10 min) oraz spoczynku (5 min). Układ łącznie z czasem adaptacji pracował 121 dni. Powietrze wykorzystywane w fazie reakcji (napowietrzania) doprowadzane było do układu w postaci drobnych pęcherzyków przez dyfuzor. W celu regulacji prędkości przepływu powietrza i utrzymania jej na stałym poziomie wynoszącym 0,8 cm/s (w przekroju

poprzecznym reaktora wartość ta odpowiada przepływowi 110 dm³/h – dla R1 i 225 dm³/h – dla R2) zastosowano rotometry. Parametry technologiczne układu badawczego przedstawiono w tab. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – zbiornik ścieków surowych, 2 – pompa dozująca ścieki surowe, 3 – reaktor typu SBR, 4 – pompa ścieków oczyszczonych, 5 – zbiornik ścieków oczyszczonych, 6 – dmuchawa, 7 – rotametr, 8 – dyfuzor, 9 – dekanter, 10 – układ sterujący

Fig. 1. The test bench scheme: 1 – raw sewage container, 2 – raw sewage dosing pump, 3 – reactor SBR, 4 – treated sewage pump, 5 – treated sewage container, 6 – blower, 7 – rotameter, 8 – diffuser, 9 – control system.

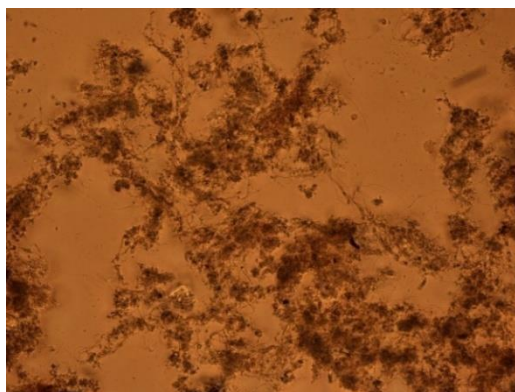
Tabela 1. Parametry technologiczne układu z granulowanym osadem czynnym

Table 1. Technological parameters of the test set with granular activated sludge

Lp.	Parametr	Jednostka	REAKTOR	
			R1	R2
1.	objętość całkowita reaktora	[dm ³]	4,6	9,4
2.	objętość czynna reaktora	[dm ³]	3,0	6,0
3.	przepływ ścieków średni dobowy ($Q_{\text{śrd}}$)	[dm ³ /d]	7,2	14,4
4.	współczynnik dekantacji ścieków (f_D)	[-]	0,4	0,4
5.	ilość ścieków doprowadzanych podczas jednego cyklu (ΔV)	[dm ³]	1,2	2,4
6.	natężenie przepływu powietrza w reaktorze	[dm ³ /h]	110	225

W badaniach zastosowano ścieki syntetyczne o składzie zaproponowanym przez Thanh i wsp. [17]: glukoza ($0,664 \text{ g/dm}^3$), NaHCO_3 ($0,45 \text{ g/dm}^3$), NH_4Cl ($0,15 \text{ g/dm}^3$), KH_2PO_4 ($0,043 \text{ g/dm}^3$), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($0,030 \text{ g/dm}^3$), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0,012 \text{ g/dm}^3$), FeCl_3 ($0,0036 \text{ g/dm}^3$) oraz śladowa ilość mikroelementów. Głównym źródłem węgla organicznego w ściekach była glukoza.

Osad czynny użyty do zaszczerpienia reaktorów pobrano z komory nityfikacji oczyszczalni ścieków w Rzeszowie. Przed wprowadzeniem osadu do reaktorów poddano go procesowi zagęszczania grawitacyjnego. Drobne kłaczkosy osadu charakteryzowała mała spójność i nieregularne kształty. Zaobserwowano znaczny udział orzęsek (szczególnie pełzających z rodzaju *Aspidisca*) oraz liczne bakterie nitkowate (rys. 2). Charakterystyki kłaczków oraz składu jakościowego i ilościowego organizmów osadu czynnego dokonano w oparciu o obserwacje mikroskopowe, z wykorzystaniem literatury umożliwiającej oznaczenie organizmów [2, 5, 9]. Stężenie suchej masy osadu (S.M.), którym zaszczerpieno reaktory, wynosiło $3,62 \text{ g s.m./dm}^3$, natomiast indeks objętościowy (IO) osadu ok. $228 \text{ cm}^3/\text{g}$. Do zaszczerpienia reaktorów zastosowano osad w ilości odpowiadającej 60% objętości czynnej odpowiednio R1 oraz R2.



Rys. 2. Osad użyty do zaszczerpienia reaktorów

Fig. 2. Sludge used to inoculate the reactors

Po zaszczerpieniu układu osadem czynnym i czterodniowym okresie jego adaptacji, przystąpiono do wykonywania analiz fizyko-chemicznych ścieków surowych i oczyszczonych (ChZT oznaczano metodą dwuchromianową zgodnie z normą PN-74/C-04578.03) oraz obserwacji osadu. Obserwacje mikrobiologiczne osadu prowadzono z wykorzystaniem mikroskopu optycznego. Dodatkowo w obserwacjach osadu wykorzystano mikroskop polaryzacyjny Nikon Eclipse LV100POL, wyposażony w kamerę cyfrową Nikon DS Camera Control Unit DS-L1.

Stężenie zawiesin w ściekach oczyszczonych i IO określano odpowiednio zgodnie z normami PN-72/C-04559/02 i PN-EN 14702-1:2008.

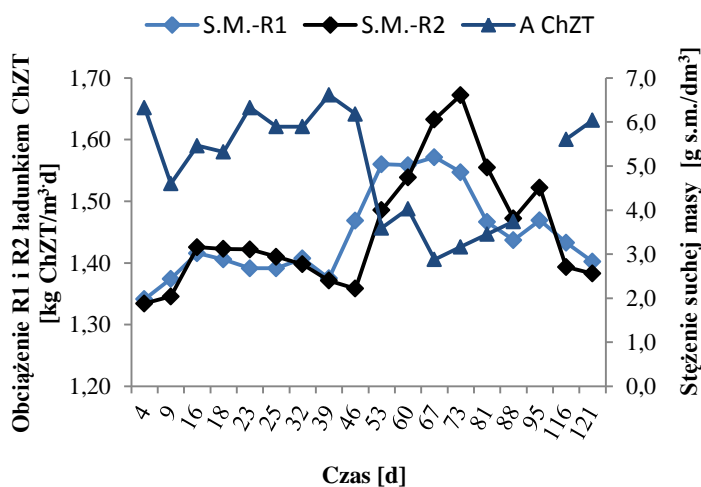
3. Wyniki badań, charakterystyka czynników wpływających na proces granulacji

Na podstawie informacji zawartych w literaturze, w celu przeprowadzenia badań przyjęto odpowiednie parametry pracy reaktorów, które wykazały istotny wpływ na proces granulacji, m.in.: konstrukcja reaktora (wysoki stosunek H/D), współczynnik dekantacji, czas sedymentacji, jak również intensywność napowietrzania oraz utrzymanie wysokiego obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń organicznych.

Dotychczasowe prace prowadzone w układach GSBR wykazały, że reaktor powinien charakteryzować się wysokim stosunkiem H/D, który umożliwi uzyskanie prędkości opadania cząstek rzędu $5 \div 10$ m/h, co pozwala na selekcję mikroorganizmów – w reaktorze pozostaje biomasa o dobrych właściwościach sedymentacyjnych i następuje tworzenie granul [19]. Badania prowadzono w dwóch reaktorach R1 i R2, dla których stosunek H/D wynosił odpowiednio 17,1 i 12. Z przeglądu literatury wynika, że wartość H/D powinna mieścić się w przedziale 5-20 [1, 18]. Odpowiedni stosunek H/D wpływa na formowanie granul o regularnych kształtach, poprzez cyrkulacyjną trajektorię cząstek [11].

Współczynnik dekantacji w reaktorach (f_D) przyjęto 0,4, podobnie jak w badaniach [3], którzy starali się określić stabilne biologiczne usuwanie związków biogennych, podczas rozwoju granulowanego osadu, stosując różny stosunek wymiany objętościowej w układzie GSBR. Usuwanie azotu i fosforu uzyskali wyłącznie przy f_D równym 40%, a wyższe wartości (50% i 60%) wpływały na masowe wymywanie biomasy i w konsekwencji prowadziły do niestabilnego usuwania związków biogennych. W publikacji [22] zastosowano wysoki stopień wymiany objętościowej na poziomie 80%, co początkowo powodowało intensywne wymywanie biomasy z reaktora, sprzyjając tworzeniu agregatów, ale jednocześnie zapewniło usuwanie związków biogennych.

Zastosowanie krótkiej fazy sedymentacji (5 min) powodowało początkowo wymywanie biomasy z reaktora i w fazie adaptacji nastąpił spadek wartości stężeń zawiesin osadu w reaktorach z 3,62 do 1,98 (R1) i 1,88 (R2) g s.m./dm³, wpływając w konsekwencji korzystnie na proces granulacji. Krótki czas sedymentacji wpływał na zatrzymanie w reaktorze biomasy o dobrych właściwościach oraz wypłukanie z reaktora tych cząstek, które nie opadały wystarczająco szybko. W kolejnych dobach pracy reaktora następował wzrost stężenia suchej masy, a wartości średnie wynosiły 3,43 (R1) i 3,53 (R2) g s.m./dm³. Najwyższe wartości stężenia zaobserwowano od 53 do 81 doby, dla R1 wynosiły $3,73 \div 5,20$ g s.m./dm³ oraz $4,0 \div 6,61$ g s.m./dm³ dla R2 (rys. 3). Wang i wsp. [20] badania nad procesem granulacji rozpoczynali od stężenia osadu na poziomie 7800 mg s.m./dm³, po 25 dniach eksperymentu wartość ta obniżyła się o ok. 55% (3500 mg s.m./dm³). W technologii granulowanego osadu czynnego zastosowanej w praktyce do oczyszczania ścieków przemysłowych, osad osiągnął stężenie do 15 g s.m./dm³, przy IO ok. 20-40 cm³/g s.m [7].



Rys. 3. Zmiany stężenia suchej masy osadu oraz obciążenia reaktorów ładunkiem ChZT w czasie trwania badań

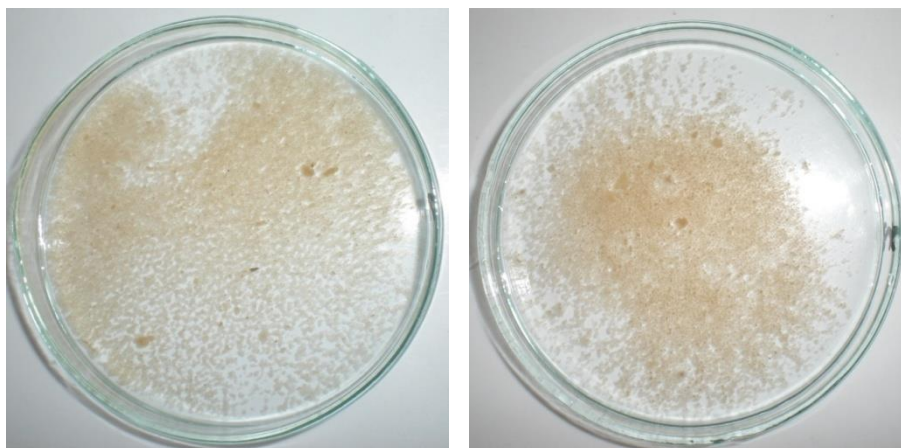
Fig. 3. Changes in the concentration of dry solids and COD load rate of reactors during the tests

Prędkość przepływu powietrza w reaktorach przyjęto na poziomie 0,8 cm/s. Beun i wsp. [1] wykazali, że gładkie i trwałe granule tworzą się przy prędkości przepływu 4,1 cm/s, a przy niższych wartościach (1,4 ÷ 2,0 cm/s) trwałe granule nie są formowane. Jednak Tay i wsp. [16] swoimi badaniami dowiedli, że prędkość przepływu powietrza powyżej 0,3 cm/s jest już wystarczająca, aby powstały odpowiednie oddziaływania sił hydrodynamicznych, które zapewniają formowanie się granul. Intensywne napowietrzanie reaktorów na poziomie 110 dm³/h (R1) i 225 dm³/h (R2) przekładało się na stężenie tlenu rozpuszczonego w reaktorach. Średnie stężenie tlenu rozpuszczonego wynosiło 4,70 mg O₂/dm³ (R1) i 4,62 mg O₂/dm³ (R2). Utrzymanie odpowiedniego poziomu tlenu rozpuszczonego wpływa na strukturę mikroorganizmów granul. Niskie stężenie tlenu rozpuszczonego może spowodować rozwój niektórych bakterii nitkowatych, np. *Thiothrix sp.* [12]. Niektóre bakterie nitkowate, takie jak *Microthrix parvicella* mogą się rozwijać w szerokim zakresie stężeń tlenu rozpuszczonego [6].

Średnia wielkość obciążenia reaktorów ładunkiem zanieczyszczeń organicznych wynosiła 1,47 kg ChZT/m³·d. Ze względu na przyjęte parametry technologiczne reaktorów, pracowały one przy jednakowym obciążeniu ładunkiem ChZT. Od 4 do 46 doby wartości obciążenia reaktora zmieniały się w zakresie 1,52 ÷ 1,67 kg ChZT/m³·d, natomiast od 53 do 88 doby nastąpił ich spadek o 7,9 ÷ 11,4% (rys. 3). Przykładowo Wang i wsp. [20] wyhodowali drobne granule przy obciążeniu reaktora 0,4 kg ChZT/m³·cykl. Zheng i wsp. [23] wykazali, że

przy wielkości obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń organicznych ok. 6,0 kg ChZT/m³·d następowało zagęszczanie tlenowych granul, jednak traciły one stopniowo swoją stabilność w wyniku rozwoju bakterii nitkowatych.

Przyjęte wartości poszczególnych parametrów, które mają istotny wpływ na granulację, pozwoliły na wykształcenie się granulowanego osadu czynnego w obu reaktorach. Jego konsystencja była wyraźnie grudkowata (rys. 4).

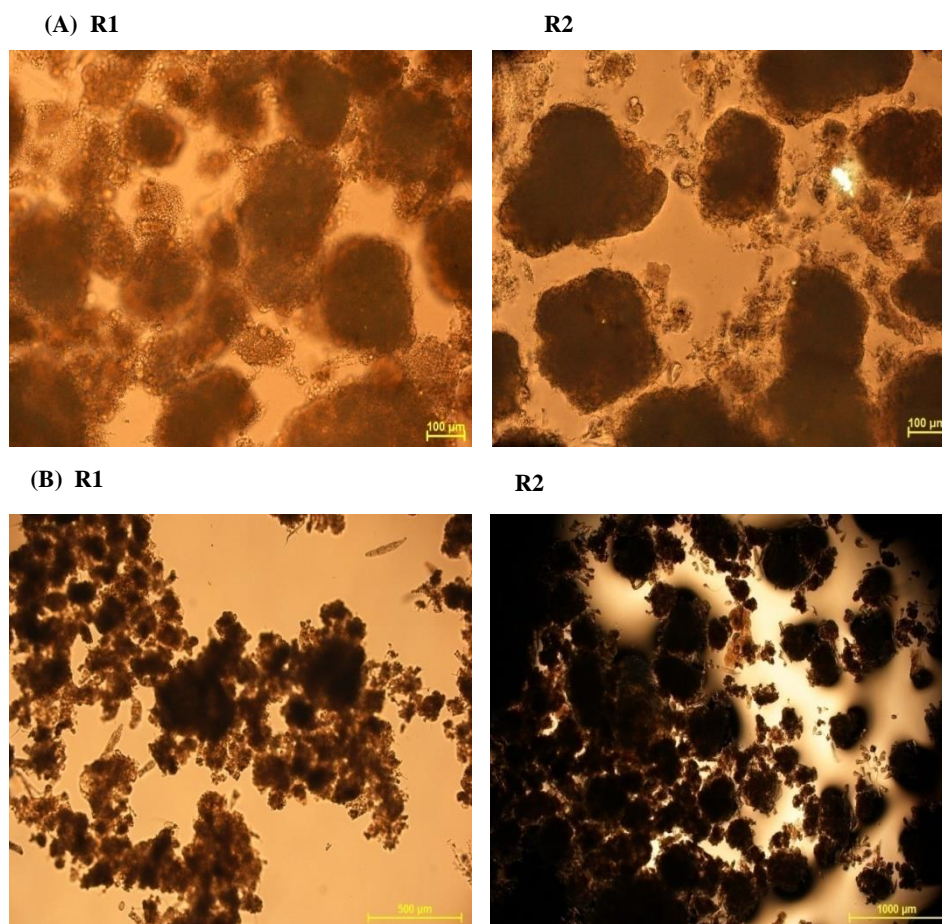


Rys. 4. Tlenowy osad granulowany wyhodowany w warunkach laboratoryjnych

Fig. 4. Aerobic granular sludge grown in the laboratory environment

Proces granulacji osadu nastąpił dość szybko, jednak granule charakteryzowały się niewielkimi średnicami. W 16 dniu badań zaobserwowano znaczny udział niewielkich kulisto-kształtnych kłaczków o zbitej strukturze oraz dużą redukcję bakterii nitkowatych. Kolejne analizy wykazywały wzrastający udział granul. W 60-tej dobie stwierdzono, że kłaczkosy osadu uformowały wyraźne granule o gładkich, zaokrąglonych brzegach. Średnica granul wynosiła ok. 0,2 mm w R1 i ok. 0,3 mm w R2. Około 25% stanowiły kłaczkosy drobne, luźne, o nieregularnych kształtach. Ponadto stwierdzono znaczny wzrost bioróżnorodności. Oprócz dominujących w pierwszej fazie eksperymentu orzęsek pelzających z rodzaju *Aspidisca*, zaobserwowano liczne orzęski osiadłe (*Vorticella sp.*, *Carchesium sp.*, *Epistylis sp.*), wrotki (*Philodonia roseola*, *Monostyla decipiens*, *Notommata cyrtopus*), korzenionóżki (*Amoeba sp.*, *Arcella sp.*) oraz nicienie. Odnotowane rodzaje orzęsek, wrotek oraz korzenionózek są wskaźnikami efektywnego oczyszczania ścieków oraz dużej stabilności układu [2, 9, 10]. Na uwagę zasługuje również fakt sporadycznie występujących wiciowców oraz brak bakterii wolnopływających. Świadczy to o prawidłowym obciążeniu osadu i dobrym natlenieniu [5]. Natomiast ilość bakterii nitkowatych znaczenie spadła, z kategorii 4 do 1 (według Eikelboom'a), co było jedną z przyczyn znacznego spadku wartości indeksu objętościowego osadu w obu reaktorach. W 121 dobie

wartości średnic wynosiły odpowiednio $0,2 \div 0,3$ mm (R1) i $0,4 \div 0,45$ mm (R2), więc średnica granул w R2 była większa o ok. $0,1 \div 0,15$ mm od granул z R1. Osad w porównywanych reaktorach pod względem składu biologicznego nie różnił się. W obu przypadkach zaobserwowano natomiast masowe występowanie wrotek z rodzaju *Philodonia roseola* (rys. 5). Jest to jeden z najpowszechniej występujących w osadzie czynnym gatunków wrotek i nie jest wskaźnikiem ani zaburzonej, ani efektywnej pracy osadu.



Rys. 5. Osad w procesie granulacji: (A) 60 dzień pracy układu, (B) 121 dzień pracy układu
Zdjęcia wykonane mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV100POL będącym na wyposażeniu Laboratorium Biofizycznego w Katedrze Fizyki Politechniki Rzeszowskiej, który zakupiono w ramach ZRORR

Fig. 5. Sludge in granulation process: (A) 60-th day working of the test set, (B) 121-th day working of the test set

Indeks objętościowy osadu na początku badań wynosił ok. $121 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$ (R1) i ok. $149 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$ (R2). Od 9 do 25 doby średnie wartości IO wynosiły odpowiednio ok. 75 i $82 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$ Po tym czasie nastąpił spadek średnich wartości indeksu osadu do $40 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$ w R1 i $36 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$ w R2. Według Ivanov i wsp. [8] dojrzałe granule charakteryzują się indeksem objętościowym osadu na poziomie $70 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$

4. Wnioski

Zastosowane parametry technologiczne pracy reaktorów umożliwiły proces granulacji tlenowego osadu czynnego. Odpowiedni stosunek pomiędzy wysokością, a średnicą każdego z reaktorów, jak również krótki czas sedymentacji sprzyjały selekcji mikroorganizmów biomasy, umożliwiając zatrzymanie w reaktorze biomasy o dobrych właściwościach. W reaktorze R2, dla którego wartość H/D była niższa, wyhodowano granule o większej średnicy. Przyjęty stopień wymiany objętościowej na poziomie 40% zapewnił formowanie granul. Nie zaobserwowano zjawiska flokulacji biomasy, którego występowanie przy stopniu wymiany 20÷40% stwierdzili Wang i wsp. [21].

Optymalne stężenie suchej masy w systemach biologicznego oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, do zintegrowanego usuwania C, N i P, wynosi od 2 do 4 g s.m./dm^3 [14]. Struktura tlenowych granul osadu czynnego pozwala uzyskać wyższe stężenie biomasy w reaktorze. W przypadku R1 wartości te dochodziły do $5,20 \text{ g s.m./dm}^3$ oraz $6,61$ dla R2. Średnia wartość stężenia suchej masy była wyższa o ok. 3% w reaktorze R2.

Wyniki procesu granulacji w obu reaktorach widoczne były już w 16-tej dobie pracy reaktorów, kiedy to zaobserwowano znaczny udział niewielkich kulisto-kształtnych kłaczek o zbitej strukturze. W dalszym toku badań granulki osadu w R2 odznaczały się większymi średnicami o $0,1\div 0,15 \text{ mm}$ względem granul z R1, a sam osad lepiej sedymentował.

Analizując wyniki badań dla reaktorów, które pracowały przy jednakowej wartości obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń, natomiast różniła je geometria, stwierdza się, że proces granulacji korzystniej przebiegał w reaktorze o większej średnicy (granule charakteryzowały się większymi średnicami, szybciej sedymentowały), tak więc czynnikiem mającym wpływ na proces granulacji jest odpowiedni stosunek H/D.

Literatura

- [1] Beun J.J., Hendriks A., van Loosdrecht M.C.M., Morgenroth E., Wilderer P.A., Heijnen J.J.: Aerobic granulation in a sequencing batch reactor, *Water Research*, no 33, 10, 1999, s. 2283–2290.
- [2] Cichowicz M.: Organizmy osadu czynnego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.

- [3] Coma M., Puig S., Serón N., Balaguer M.D., Colprim J.: Granular sludge development at different exchange ratios for nutrient removal, 2nd IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes 6-9th of September 2009 Kraków, Poland.
- [4] de Kreuk M.K., McSwain B.S., Bathe S., Tay J., Schwarzenbeck S.T.L., Wilderer P.A.: Discussion outcomes. Ed. In: *Aerobic Granular Sludge, Water and Environmental Management Series*. IWA Publishing 2005, Munich, pp. 165-169.
- [5] Eikelboom D. H., van Buijsen H. J. J.: *Podręcznik mikroskopowego badania osadu czynnego*, Wydawnictwo Seidel – Przywecki sp. z o.o., Szczecin 1999
- [6] Gao D., Liu L., Liang H., Wu W.-M.: Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment, *Critical Reviews in Biotechnology*, no 31(2), 2011, pp. 137-152.
- [7] Gromiec M.J.: NEREDA - innowacyjna technologia granulowanego osadu czynnego do oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych, *Gaz, Woda i Technika sanitarna*, nr 5, 2011, s. 179-183.
- [8] Ivanov V., Wang X.-H., Tay S. T.-L., Tay J.- H.: Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment, *Applied Microbiology and Biotechnology*, no 70, 2006, pp. 374–381.
- [9] Klimowicz H.: *Znaczenie mikrofauny przy oczyszczaniu ścieków osadem czynnym*, Dział Wydawnictw Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa 1989.
- [10] Kocwa – Haluch R., Woźniakiewicz T.: Analiza mikroskopowa osadu czynnego i jej rola w kontroli procesu technologicznego oczyszczania ścieków, *Czasopismo techniczne. Środowisko*. z. 62 – Ś, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [11] Kończak B., Miksch K.: Proces formowania granulowanego osadu w warunkach tlenowych: przegląd literaturowy, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, nr 51, 2011, s. 43-51.
- [12] Lee S., Basu S., Tyler CW., Pitt PA.: A survey of filamentous organisms at the Deer Island Treatment Plant, *Environmental Technology*, no. 24(7), 2003, pp. 855-865.
- [13] Liu Y., Tay J.H.: State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment, *Biotechnology Advances*, no 22(7), 2004, pp. 533-563.
- [14] Miksch K., Sikora J.: *Biotechnologia ścieków*, Wyd. Naukowe PWN, 2010.
- [15] Sunil S.A., Duu-Jong L., Kuan-Yeow S., Joo-Hwa T.: Aerobic granular sludge: Recent advances, *Biotechnology Advances*, no 26, 2008, pp. 411-423.
- [16] Tay J.H., Liu Q.S., Liu Y.: The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules, *Applied Microbiology and Biotechnology*, no 57, 2001, pp. 227-233.
- [17] Thanh B.X., Visvanathan C., Ben Aim R.: Fouling characterization in aerobic granulation coupled baffled membrane bioreactor, *IWA International Conference on Particle Separation*, 9-11 July 2007, Toulouse, France.
- [18] Qin L., Liu Y., Tay J.H.: Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor, *Biochemical Engineering Journal*, no 21, 2004, pp. 47-52.

- [19] Usmani S.Q., Sabir S., Farooqui I.H., Ahmad A.: Biodegradation of phenols and p-cresol by sequential batch reactor proc, *International Conference on Environmental Research and Technology*, no 10, 2008, pp. 906-910.
- [20] Wang Q., Du G., Chen J.: Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force, *Process Biochemistry*, no 39(5), 2004, pp. 557-563.
- [21] Wang Z.W., Liu Y., Tay J.H.: The role of SBR mixed liquor volume exchange ratio in aerobic granulation, *Chemosphere*, no 62(5), 2006, pp. 767-771.
- [22] Wojnowska-Baryła I., Cydzik-Kwiatkowska A., Szatkowski M., Gutowski Ł.: Granulacja osadu czynnego w reaktorze SBR, *Biotechnologia*, nr 1(88), 2010, s. 161-169.
- [23] Zheng Y.M., Yu H.Q., Liu S.J., Liu X.Z.: Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions, *Chemosphere*, no 63, 2006, pp. 1791-1800.

AEROBIC GRANULAR SLUDGE – FACTORS AFFECTING THE GRANULATION PROCESS IN THE SEQUENCING BATCH REACTORS

Summary

In 2005, the International Water Association (IWA - *Workshop Aerobic Granular Sludge*) held the first session of aerobic granular sludge seminars at the Technical University of Munich in Germany, and a clear definition of aerobic granular sludge was established, i.e. granules making up aerobic granular activated sludge are to be understood as aggregates of microbial origin, which do not coagulate under reduced hydrodynamic shear, and which settle significantly faster than activated sludge flocs. SBR systems that use granular sludge have many advantages that arise from the properties of the granules: a good settling property, a long sludge retention time and no sludge bulking was observed with the aerobic granular sludge. To date, the published literature has indicated that aerobic granulation is mainly dependent on reactor configuration, environmental and operational conditions. The formation of aerobic granules is a complex process controlled by several factors: aerobic starvation, composition of the medium, organic loading rate and hydrodynamic forces.

The paper presents the results of research and characteristics of factors which affects the granulation process in the sequencing batch reactors GSBR (Granular Sequencing Batch Reactor). In order to ensure conditions suitable for the granulation process, based on the literature, following values have been matched: decantation, the air velocity and amount of dissolved oxygen. This allowed to examine the affect of the height and width ratio of the reactor (H/D - height/diameter) on the process of aerobic sludge granulation. The applied technological operating parameters of the reactors allowed the aerobic granulation process of activated sludge, also the structure of the granules allowed to get a higher biomass concentration in the reactors.

Keywords: aerobic granular sludge, reactor GSBR, reactor configuration.

DOI: 10.7862/rb.2013.45

Przesłano do redakcji w lipcu 2013 r.

Przyjęto do druku we wrześniu 2013 r.