

## PRACE NAUKOWO-PRZEGLĄDOWE

---

Przeegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 51, 2011: 43–51  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 51, 2011)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 51, 2011: 43–51  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 51, 2011)

**Beata KOŃCZAK, Korneliusz MIKSCH**

Katedra Biotechnologii Środowiskowej, Politechnika Śląska  
Environmental Biotechnology Department, Silesian University of Technology

### **Proces formowania granulowanego osadu w warunkach tlenowych: przegląd literaturowy** **Process of aerobic granules formation: state of the art**

**Słowa kluczowe:** tlenowe granule, kinetyczna selekcja, polimery zewnątrzkomórkowe, DLVO, kationy dwuwartościowe  
**Key words:** aerobic granules, formation, kinetics selection, extracellular polymeric substances, DLVO, divalent cations

#### **Wprowadzenie**

W ciągu ostatnich lat obserwuje się zainteresowanie metodami oczyszczania ścieków, w których biomasa immobilizowana jest w postaci granulatu. W latach osiemdziesiątych rozpoczęto badania nad opracowaniem i wdrożeniem technologii beztlenowego oczyszczania ścieków z wykorzystaniem granulowanego osadu (m.in. reaktor UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Technologia ta posiada liczne zalety, takie jak wysoki stopień usunięcia zanieczyszczeń organicznych nawet przy wysokim obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń i przy niskiej temperaturze. Charakteryzuje się

małą konsumpcją energii i małą produkcją osadów nadmiernych. Niestety, systemy te zapewniają tylko częściowe usunięcie patogenów oraz związków azotu i fosforu, a dodatkowo wydzielają odór (powstaje dużo  $H_2S$ ). Niedogodnością jest także długi czas rozruchu związany z wolnym czasem narastania bakterii metanogennych (Seghezzi i in. 1998).

Rozwiązanie tych problemów może przynieść technologia granulowanego osadu w warunkach tlenowych, której badania rozpoczęły się w latach dziewięćdziesiątych (Mishima i Nakamura 1991). Granule o kompaktowej, gęstej strukturze, średnicy 0,2–20 mm oraz doskonałych właściwościach sedymentacyjnych udało się pozyskać w reaktorze SBR (Sequencing Batch Reactor) – Morgenroth i inni (1997), Beun i inni (1999), Jang i inni (2003), Liu i inni (2008), Wojnowska-Baryła i inni (2010). Ponadto tlenowe granule cechują: sferyczny lub elipsoidalny kształt; gładka

(skóropodobna) bądź postrzępiona powierzchnia (w przypadku gdy dominują bakterie nitkowate i grzyby), przeważnie cechująca się właściwościami hydrofobowymi; warstwowa budowa – każda warstwa utworzona jest przez mikroagregaty specyficznych grup mikroorganizmów, natomiast wewnątrz przypomina żel, czasami w centrum dużych granул obserwuje się czarną, obumarłą materię organiczną bądź pęcherzyk gazu; obecność kanałów i porów, dzięki czemu możliwy jest transport masy i powietrza do wnętrza granuli; inkluzje kationów. Cechy te sprawiają, iż technologia granulowanego osadu w warunkach tlenowych może znaleźć zastosowanie do oczyszczania ścieków zarówno o małym, jak i dużym obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń, usuwania związków azotu i fosforu, a także toksycznych substancji. Jednakże wprowadzenie technologii na rynek przemysłowy wymaga żmudnych badań, dotyczących samego procesu formowania granulowanego osadu. Uformowanie granул osadu o zwartej, jednorodnej strukturze, które będą zachowywały długo swoją stabilność, niezależnie od obciążenia reaktora ładunkiem zanieczyszczeń biogenych czy obecności substancji toksycznych w dopływających ściekach, stanowi wyzwanie dla badaczy.

W niniejszym artykule zgromadzono najważniejsze informacje, dotyczące procesu formowania granulowanego osadu w warunkach tlenowych z ostatnich 19 lat. Zebrana i usystematyzowana wiedza pozwala uwydatnić problemy, które wymagają jeszcze rozwiązania i stanowi podstawę dla przyszłych badań.

Praca została sfinansowana z grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr N N523 453936).

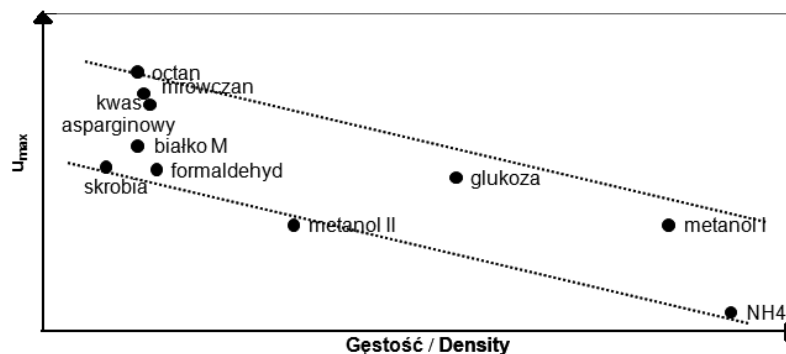
## **Formowanie granул**

### **Kompozycja pożywki**

Formowanie tlenowych granул i ich struktura wydają się zależeć od rodzaju substancji obecnych w dopływających ściekach. Badania z ostatnich lat pokazały, iż tlenowe granule można pozyskać, stosując różnorodne substraty, takie jak: glukoza, skrobia, octan sodu, etanol, metanol, fenol, fruktoza, maltoza, przy czym proces granulacji przebiega najintensywniej w obecności prostych, niezłożonych substratów (Villaseñor i in. 2000, Tay i in. 2002, Adav i Lee 2008, Adav i in. 2008, Konczak i Miksch 2009). W literaturze odnaleźć można także informacje o formowaniu się granул w obecności ścieków bytowo-gospodarczych oraz przemysłowych (Arrojo i in. 2004, Schwarzenbeck i in. 2005).

Villaseñor i inni (2000) podają, iż rodzaj substratu wpływa na szybkość wzrostu mikroorganizmów, a jednocześnie na strukturę i gęstość utworzonych biofilmów (rys. 1).

Octan sodu sprzyja formowaniu bardzo stabilnych granул, natomiast substraty, takie jak węglowodany, powodują rozwój mikroorganizmów nitkowatych, które z kolei pogarszają stabilność utworzonych granул. Mikroorganizmy nitkowate można było także zaobserwować w granulach utworzonych na pożywce zawierającej fenol, a także w ściekach z przemysłu mleczarskiego (Schwarzenbeck i Wilderer 2005). Liu i Lin (2006) podają, że gdy obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń jest zbyt duże, to niezależnie od rodzaju substratu obserwuje się intensywny rozwój bakterii nitkowatych.



RYSUNEK 1. Wpływ substratu na szybkość wzrostu mikroorganizmów i gęstość biofilmu (Villaseñor i in. 2000)

FIGURE 1. Influence of substrate on bacterial growth yield and biofilm density

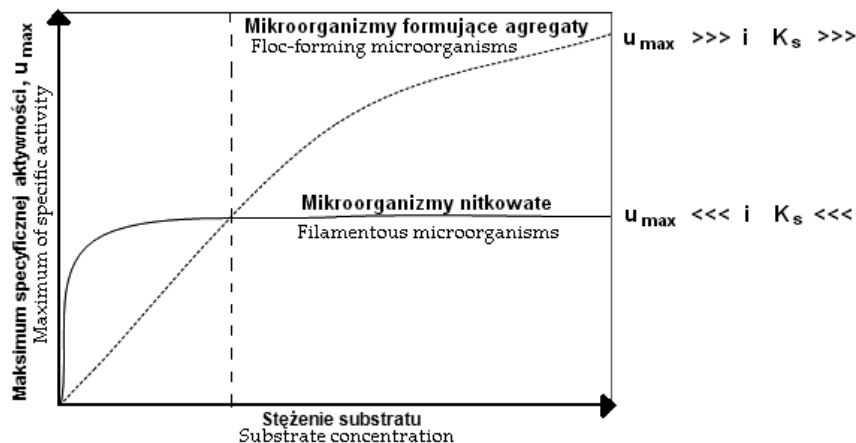
### Warunki „uczta-głód”

Mikroorganizmy granulowanego osadu do wzrostu w postaci agregatów potrzebują cyklicznie następujących po sobie dwóch faz: fazy „uczty”, w czasie której substrat jest dostępny dla mikroorganizmów, i fazy „głodu”, w czasie której substrat jest nieobecny w cieczy otaczającej. W sytuacji gdy substrat konsumowany jest bardzo szybko i przez pozostały okres napowietrzania jest nieobecny w cieczy, przetrwać mają szansę tylko te mikroorganizmy, które mają zdolność wiązania substratu w formie PHB (kwas polihydroksybutanowy) i akumulowania go wewnątrz komórek. Mikroorganizmy te zużywają PHB w czasie fazy „głodu” i następuje przyrost biomasy. Dodatkowo posiadają one zdolność łączenia się w agregaty. Natomiast mikroorganizmy, które nie akumulują polimerów, mogą wzrastać tylko w fazie „uczty”, co w konsekwencji sprawia, iż szybko zostają wypłukane z układu, a w systemie zaczynają dominować mikroorganizmy formujące agregaty.

Różnice w szybkości wzrostu mikroorganizmów tłumaczy teoria kinetycz-

nej selekcji opracowana przez Chudoba i Pujor (1994), opierająca się na równaniu Monoda. Równanie to definiuje wzrost mikroorganizmów i uwzględnia ich odmienne stałe saturacji, w związku z czym zależność między specyficzną prędkością wzrostu a stężeniem substratu także jest odmienne dla różnych mikroorganizmów.

Rysunek 2 przedstawia teorię kinetycznej selekcji w odniesieniu dla mikroorganizmów nitkowatych oraz flokujących i tworzących granule. Zgodnie z tą teorią, można kontrolować proces granulacji, dobierając odpowiednio stężenie substratu. Mikroorganizmy nitkowate narastają wolno oraz charakteryzują się bardzo małą wartością stałej saturacji ( $K_s$ ) i małą szybkością maksymalnego wzrostu ( $\mu_{max}$ ) – Liu i Lin (2006). I odwrotnie – mikroorganizmy flokujące, formujące agregaty, narastają szybko, a wartość ich stałej  $K_s$  jest większa. Zatem małe stężenie substancji biodegradowalnej sprzyja rozwojowi mikroorganizmów nitkowatych. Dodatkowo mikroorganizmy flokujące, w porównaniu z mikroorganizmami nitkowatymi,



RYSUNEK 2. Teoria kinetycznej selekcji (Chudoba i Pujor 1994)  
 FIGURE 2. Kinetic selection theory

znacznie szybciej zużywają substancje organiczne, zatem będą one dominować w systemach o dużym obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń organicznych. Należy jednak pamiętać, że nie tylko gradient substratu jest potrzebny, aby wyeliminować mikroorganizmy nitkowate. Konieczne jest także zapewnienie okresu, w którym substrat nie jest obecny w cieczy, co z powodzeniem można uzyskać w systemach pracujących cyklicznie, takich jak reaktory SBR.

#### Obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń

Właściwości granulowanego osadu zależą od obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń organicznych. Jak podają Moy i inni (2002), im większy jest ładunek zanieczyszczeń, tym granule charakteryzuje mniejsza gęstość i wytrzymałość. Zheng i inni (2006) tłumaczą utratę stabilności ograniczonym transportem masy i powstawaniem stref bez-tlenowych w dużych granulach. Podają, iż granule tworzą się nawet przy obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń rzędu

6 kg ChZT·m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup>, jednakże przy tak dużym obciążeniu zaczynają dominować mikroorganizmy nitkowate.

#### Kationy

Procesowi granulacji sprzyja obecność kationów dwuwartościowych, a zwłaszcza kationów Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup>. Sobeck i inni (2002) przedstawili trzy teorie tłumaczące wpływ kationów na proces bio-flokulacji:

1. Teoria DLVO – to klasyczna teoria koloidów, według której każda naładowana cząstka otoczona jest podwójną warstwą ładunków. Pierwsza utworzona jest z mocno związanych ze sobą jonów, druga, nazywana często warstwą dyfuzyjną, złożona jest ze słabo związanych jonów o ładunku przeciwnym. Stężenie jonów maleje wraz z odległością od powierzchni cząsteczki, aż do momentu, w którym osiąga ono wartość równą stężeniu jonów w cieczy otaczającej. Rezultatem tego jest powstały ładunek elektryczny wokół cząsteczki. Ta podwójna warstwa jonów powoduje odpychanie się

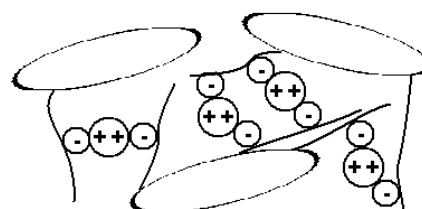
cząstek i hamuje agregację. Gdy stężenie jonów w cieczy otaczającej roślinę, wtedy maleje rozmiar warstwy podwójnej, a tym samym siła odpychania między cząstkami, zwiększa się natomiast siła przyciągania. Zatem obecność kationów w roztworze sprzyjać będzie procesowi bioflokulacji czy biogranulacji.

2. Teoria Alginianowa – w osadzie czynnym występują mikroorganizmy, takie jak *Azotobacter* sp. czy *Pseudomonas aeruginosa*, produkujące polisacharyd o nazwie alginian. Alginian zbudowany jest z naprzemiennie ułożonych grup mannuronowych i glukuronowych. W obecności kationów wapnia łańcuchy alginianu łączą się w specjalny sposób ze sobą, tworząc układ nazywany modelem pudełka na jajka (rys. 3). Cały proces nazywany jest żelowaniem i wspomaga „sklejanie” komórek bakteryjnych ze sobą.

3. Teoria mostków łączących – kationy dwuwartościowe mają bezpośredni wpływ na proces bioflokulacji i biogranulacji, ponieważ łączą się poprzez polimery zewnątrzkomórkowe z ujemnie

naładowanymi grupami funkcyjnymi i w ten sposób ułatwiają komórkom agregację oraz stabilizują macierz (matrix) utworzoną z polimerów zewnątrzkomórkowych (rys. 4).

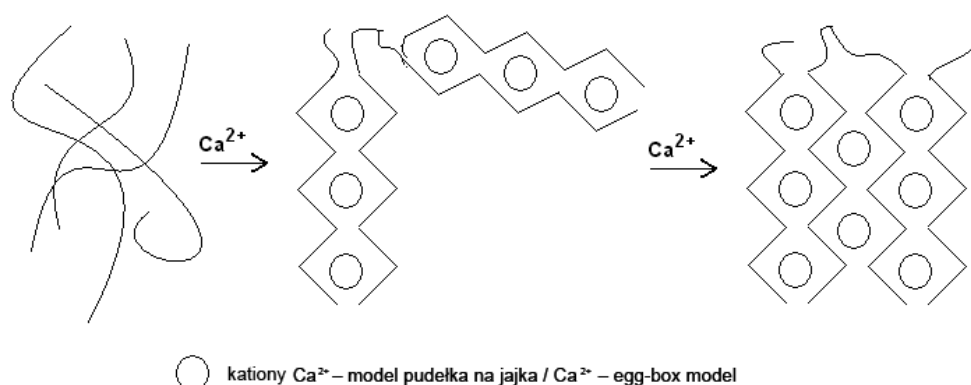
Liu i inni (2010) donoszą o różnej roli kationów wapnia i magnezu w formowaniu. Podają, że granulacja w obecności jonów wapnia przebiega szybciej niż w obecności jonów magnezu. Granule



$++$	kationy dwuwartościowe divalent cations	bakterie bacteria
$S$	biopolimery biopolymers	$-$ ujemnie naładowane grupy funkcyjne negatively charged functional groups

RYSUNEK 4. Tworzenie mostków łączących z pomocą kationów dwuwartościowych (Sobeck i in. 2002)

FIGURE 4. Divalent cation bridging theory



RYSUNEK 3. Proces żelowania w obecności kationów  $Ca^{2+}$  – model pudełka na jajka (Sobeck i in. 2002)

FIGURE 3. Gelation process in presence of  $Ca^{2+}$  – egg-box model

uformowane z dodatkiem jonów  $\text{Ca}^{2+}$  w porównaniu z tymi, które uformowane były z dodatkiem  $\text{Mg}^{2+}$ , miały lepsze właściwości fizykochemiczne, jednakże mniej efektywnie oczyszczają ścieki. Ren i inni (2008) podają, że granule uformowane z dodatkiem wapnia charakteryzuje większa stabilność niż te uformowane bez kationów. Według nich, wapno gromadzi się w postaci węglanu wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) w centrum granuli, co wzmacnia strukturę granul. Jednakże wykazali też, iż wraz ze zwiększaniem się stężenia wapnia wewnątrz granuli maleje aktywność mikroorganizmów granuli. Zatem kationy mogą mieć także negatywny wpływ na proces granulacji.

#### **Polimery zewnątrzkomórkowe**

Polimery zewnątrzkomórkowe (EPS – Extracellular Polymeric Substances) są to produkty metaboliczne akumulowane na powierzchni komórki, które zawierają różnego rodzaju substancje organiczne, takie jak: egzopolisacharydy (PS), egzoproteiny (PN), DNA, kwasy humusowe, kwasy uronowe (Wingender i in. 1999). EPS sprzyjają procesowi żelowania, łączenia się komórek w agregaty i formowania granul. Stanowią one specyficzny rodzaj ochrony dla komórki, mogą też być źródłem łatwo przyswajalnego węgla organicznego w warunkach niedoboru substancji odżywczych.

Ze względu na to, iż są one głównym komponentem granul, przypisuje im się główną rolę w procesie granulacji. Ponadto Wang i inni (2007) i McSwain i inni (2005) donoszą, iż EPS wpływają na stabilność granul. Sheng i inni (2006) podają, iż w granuli wyróżnić można dwie główne części – złożone i zagęszczone centrum granuli oraz warstwy ze-

wnętrzne. Centrum tworzą liczne, często obumarłe komórki połączone ze sobą warstwą „kleju” złożonego z EPS. Natomiast zewnętrzne warstwy utworzone są przez rozproszone i luźno związane za pomocą EPS komórki. Ta część granuli jest najbardziej dynamicznym i aktywnym układem poddanym silnemu oddziaływaniu sił hydrodynamicznych. Warstwową budowę oraz obecność EPS potwierdziły obserwacje mikroskopowe z wykorzystaniem mikroskopu konfokalnego (CLSM). Chen i inni (2007) oraz Adav i inni (2008b) w swoich badaniach wykazali, że polisacharydy spełniają rolę lepiszcza i podpory dla kolonii mikroorganizmów zlokalizowanych na powierzchni granuli. Natomiast w głębszych warstwach, gdzie utrudniona jest penetracja substratu i tlenu, znajdują się przede wszystkim białka, które stanowią źródło substancji odżywczych dla mikroorganizmów z tej strefy.

#### **Siły hydrodynamiczne**

W warunkach stresowych wywołanych oddziaływaniem sił hydrodynamicznych mikroorganizmy intensywnie produkują polimery zewnątrzkomórkowe, co sprzyja agregacji komórek. Intensywne oddziaływanie sił hydrodynamicznych powodowane jest przede wszystkim dużą prędkością przepływu powietrza ( $> 0,3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), które wywołuje ruch cyrkulacyjny cząstek w reaktorze, i sprzyja formowaniu trójwymiarowej, kolistej formy granul. Kolizje między granulami powodują odrywanie drobnych cząstek od ich powierzchni, co pozwala na utrzymanie znacznej gęstości granul i zapobiega ich nadmiernemu wzrostowi (Liu i Tay 2002).

## Czas opadania

Jest on kluczowym czynnikiem selekcyjnym wpływającym na to, iż cząstki, które nie opadają wystarczająco szybko, zostają wypłukiwane z układu. Te z kolei, które sedimentują szybko, są w nim zatrzymywane i formują agregaty. Czas sedimentacji powinien być więc możliwie krótki, tak aby tylko biomasa o doskonałych właściwościach sedimentacyjnych została w nim zatrzymana. Podaje się, iż prędkość opadania cząstek powinna być rzędu  $5\text{--}10\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ . W celu uzyskania takich prędkości opadania reaktor powinien mieć odpowiednią konfigurację. Wiadomo, iż stosunek wysokości do szerokości reaktora ( $H/D$  – height/diameter) powinien mieścić się w granicach  $5\text{--}20$  (Beun i in. 1999, Qin i in. 2004). Właściwy stosunek  $H/D$  ułatwia też cyrkulacyjną trajektorię cząstek w reaktorze, co z kolei wpływa na formowanie granul o regularnych kształtach. Mała wartość stosunku  $H/D$  sprzyja powstawaniu chaotycznych ruchów – agregaty charakteryzuje wtedy nieregularny kształt oraz duża różnica średnic.

## Stopień wymiany reaktora

Stopień wymiany reaktora jest to procentowo określona ilość cieczy odprowadzanej w czasie fazy odprowadzania w odniesieniu do całkowitej objętości cieczy w reaktorze. Wang i inni (2006), którzy badali formowanie granul w reaktorach o różnym stopniu wymiany, stwierdzili, iż formują się one w reaktorach o  $50\text{--}60\%$  stopniu wymiany. Natomiast gdy stopień wymiany wynosi  $20\text{--}40\%$ , to w reaktorze, oprócz granul, występuje też biomasa flokująca.

## Wnioski

Technologia granulowanego osadu w warunkach tlenowych ma przed sobą dużą przyszłość, gdyż może znaleźć zastosowanie do oczyszczania różnorodnych ścieków, zarówno bytowo-gospodarczych, jak i przemysłowych, zarówno o małym, jak i dużym obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń. Tlenowe granule ze względu na dużą odporność, którą zapewnia im płaszcz ochronny zbudowany z EPS, mogą być wykorzystane nawet do usuwania bardzo toksycznych substancji. Podjęto próby zbadania procesu formowania granul, wciąż jednak brakuje matematycznego modelu, który jednoznacznie opisywałby relację między procesem formowania granul a kompozycją ścieków, warunkami pracy reaktora czy jego konfiguracją. Dalsze badania, dotyczące formowania granulowanego osadu, oraz pozyskanie informacji na temat wpływu nie tylko kationów dwuwartościowych, ale i jedno- czy trójwartościowych pomogą lepiej zrozumieć istotę tego procesu i będą wskazówką dla przyszłych eksploatatorów oczyszczalni wykorzystujących tę technologię.

## Literatura

- ADAV S.S., LEE D.-J. 2008: Physiological characterization and interaction of phenol degrading aerobic granules. *Appl. Microbial Biotechnol.* 78: 899–905.
- ADAV S.S., LEE D.-J., TAY J.-H. 2008: Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule. *Wat. Res.* 42: 1644–1650.
- ARROJO B., MOSQUERA-CORRAL A., GARRIDO J.M., MENDEZ R. 2004: Aerobic granulation with industrial wastewater in

- sequencing batch reactors. *Wat. Res.* 38: 3389–3399.
- BEUN J.J., HENDRIKS A., van LOOSDRECHT M.C.M., MORGENROTH E., WILDERER P.A., HEIJNEN J.J. 1999: Aerobic granulation in a sequencing batch reactors. *Wat. Res.* 33: 2283–2290.
- CHEN M.Y., LEE D.J., TAY J.H. 2007: Distribution of extracellular polymeric substances in aerobic granules. *Appl. Microbiol. Biot.* 73: 1463–1469.
- CHUDOBA J., PUJOL R. 1994: Kinetic selection of microorganism by means of selector twenty-years progress: history, practice and problems. *Wat. Sci. Technol.* 29 (7): 177–180.
- JANG A., YOON Y.-H., KIM I.S., KIM K.-S., BISHOP L.P. 2003: Characterization and evaluation of aerobic granules in sequencing batch reactor. *Journal of Biotechnology* 105: 71–82.
- KONCZAK B., MIKSCH K. 2009: Formowanie granulowanego osadu w warunkach tlenowych. W: Podstawy biotechnologii środowiskowej – trendy, badania, implementacje. Cz. II. Red. S. Żabczyński. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice: 69–74.
- LIU Y., LIU Q.S. 2006: Causes and control of filamentous growth in aerobic granular sludge sequencing batch reactors. *Biotechnol. Advances* 24 (1): 115–127.
- LIU Y., TAY J.H. 2002: The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge. *Wat. Res.* 36: 1653–1665.
- LIU Y., WU W.W., TAY J., WANG J. 2008: Formation and long-term stability of nitrifying granules in a sequencing batch reactor. *Bioresource Technol.* 99: 3919–3922.
- LIU L., GAO D.W., ZHANG M., FU Y. 2010: Comparison of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> enhancing aerobic granulation in SBR. *Journal of Hazardous Materials* 181: 382–387.
- McSWAIN B.S., IRVINE R.I., HAUSER M., WILDERER P.A. 2005: Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge. *Appl. Environ. Microbiol.* 71 (2): 1051–1057.
- MISHIMA K., NAKAMURA M. 1991: Self-immobilization of aerobic activated sludge: a pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment. *Water Sci. Technol.* 23: 981–990.
- MORGENROTH E., SHERDEN T., van LOOSDRECHT M.C.M., HEIJNEN J.J., WILDERER P.A. 1997: Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor. *Wat. Res.* 31: 3191–3194.
- MOY B.Y.P., TAY J.H., TOH S.K., LIU Y., TAY S.T.L. 2002: High organic loading influences the physical characteristics of aerobic granules. *Lett. Appl. Microbiol.* 34: 407–412.
- QIN L., LIU Y., TAY J.H. 2004: Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor. *Biochem. Eng. J.* 21, 47–52.
- REN T.T., SHENG GP., LIU X.W., YU H.Q., ZHANG M.C.H., ZHU J.R. 2008: Calcium spatial distribution in aerobic granules and its effects on granule structure, strength and bioactivity. *Wat. Res.* 42: 3343–3352.
- SCHWARZENBECK N., WILDERER P.A. 2005: Treatment of food industry effluents in a granular sludge SBR. *Wat. and Environ. Management Series*. IWA Publishing, Munich.
- SEGHEZZO L., ZEEMAN G., van LIER J.B., HAMELERS H.V.M., LETTINGA G. 1998: A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technol.* 65 (3): 175–190.
- SHENG G.P., YU H.Q., LI X.Y. 2006: Stability of sludge flocs under shear conditions: roles of extracellular polymeric substances (EPS). *Biotechnol. Bioeng.* 93: 1095–1102.
- SOBECK D.C., HIGGINS M.J. 2002: Examination of Three Theories for Mechanisms of Cation- Induced. Bioflocculation. *Wat. Res.* 36: 527–538.
- TAY J.H., LIU Q.S., LIU Y. 2002: Characteristics of aerobic granules grown on glucose and acetate in sequential aerobic sludge blanket reactors. *Environ. Technol.* 23: 931–6.
- VILLASEÑOR J., van LOOSDRECHT M.C.M., PICIORENAU C., HEIJNEN J.J. 2000: Influence of different substrates on the formation of biofilms in a biofilm airlift suspension reactor. *Water Sci Technol.* 41, 4–5: 323–330.
- WANG Z.W., LIU Y., TAY J.H. 2006: The role of SBR mixed liquor volume exchange ratio in aerobic granulation. *Chemosphere* 62 (5): 767–771.
- WANG Z.-W., LIU Y., TAY J.-H. 2007: Mechanism of calcium accumulation in acetate-fed



- aerobic granule. *Microbiol. Biotechnol.* 74: 462–466.
- WINGENDER J., NEU T.R., FLEMMING H.C. 1999: Microbial extracellular polymeric substances. Springer, Berlin.
- WOJNOWSKA-BARYŁA I., CYDZIK-KWIATKOWSKA A., SZATKOWSKI M., GUTOWSKI Ł. 2010: Granulacja osadu czynnego w reaktorze SBR. *Biotechnologia* 1 (88): 161–169.
- ZHENG Y.M., YU H.Q., LIU S.J., LIU X.Z. 2006: Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions. *Chemosphere* 63: 1791–1800.
- of high biomass retention, high conversion capacity, less biomass production, excellent settleability and resistance to inhibitory and toxic compounds. Aerobic granules were successfully cultivated in a sequencing batch reactor (SBR). These systems fulfil most of the requirements for their formation as: substrate composition, feast-famine regime, hydrodynamic shear force, short settling time, high extracellular polymeric substances (EPS) content, inclusion of divalent cations. In this review the current knowledge of aerobic granules formation is present.

## Summary

**Process of aerobic granules formation: state of the art.** The aerobic granular activated sludge process is a promising technology for compact wastewater treatment plants. This system is superior to conventional activated sludge processes, in terms

### Authors' address:

Beata Kończak, Korneliusz Miksch  
Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice  
Poland  
Katedra Biotechnologii Środowiskowej  
e-mail: beata.konczak@polsl.pl  
korneliusz.miksch@polsl.pl