

Studies on the effectiveness of wastewater aeration with application of new technologies of micro-bubble diffusers

Badania efektywności natleniania ścieków przy zastosowaniu nowych technologii dyfuzorów mikropęcherzykowych

DOI: 10.15199/62.2019.9.4

Municipal wastewater and activated sludge from a sewage treatment plant were introduced into two lab. bioreactors with a fine bubble diffuser or with a micro bubble diffuser. The aeration process was carried out for 24 h. The dissolved O₂ concn., pH and temp. were monitored. The COD and BOD values as well as NO₃⁻, NH₄⁺ and PO₄³⁻ concns. were detd. The oxygenation of sewage treated in the reactor with a micro bubble diffuser was significantly more efficient.

W badaniach efektywności natleniania ścieków bytowych zastosowano napowietrzanie mikropęcherzykowe. W testach hydraulicznych porównano proces napowietrzania przez nowoczesne dyfuzory gumowe Airprax firmy BubleTech z dyfuzorami dyskowymi. Uzyskane wyniki wskazały na znacząco lepszą wydajność natleniania przez dyfuzory rurowe w porównaniu z dyfuzorami drobnopęcherzykowymi. W aeracji mikrobąblowej stężenie tlenu rozpuszczonego szybko wzrastało do 4 mg/L. Laminarne przepływy powietrza były w stanie zapewnić cyrkulację osadu czynnego w bioreaktorze. W reaktorach z napowietrzaniem drobnopęcherzykowym, pomimo znaczących turbulencji i wymieszania substratu, uzyskiwano stężenie tlenu 3 mg/L po ok. 20 min aeracji. Zastosowanie dyfuzorów gumowych w aeracji ścieków bytowo-komunalnych może przynieść wymierne korzyści, zwłaszcza w instalacjach małych oczyszczalni o przepływie do 5 m³/d.

Biologiczne procesy oczyszczania ścieków komunalnych bazują głównie na tlenowej biodegradacji zanieczyszczeń organicznych.

* Autor do korespondencji:

Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Al. A. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, tel.: (12) 662-41-87, e-mail: k.chmielewski@ur.krakow.pl

Konsorcja mikroorganizmów w osadzie czynnym oraz błonie biologicznej wykorzystują zanieczyszczenia organiczne jako źródło węgla organicznego. W celu utrzymania właściwego procesu nityfikacji ścieki oczyszczane wymagają utrzymania stężenia tlenu 2 mg/L¹. W większości oczyszczalni komunalnych technolodzy starają się zapewnić stężenie tlenu wynoszące ok. 3 mg/L, co pozwala na uzyskanie odpowiedniego tempa oczyszczania przy relatywnie niskich nakładach energetycznych na aerację^{2,3}. Wraz ze wzrostem ładunku węgla organicznego w ściekach utrzymanie odpowiedniego stężenia tlenu w substracie wymaga większych nakładów energetycznych³. Napowietrzanie należy do kosztochłonnych procesów i z tego powodu bardzo istotne jest monitorowanie warunków tlenowych. Zużycie energii na ten proces szacuje się na 50–80% w stosunku do całkowitego nakładu na pracę oczyszczalni, bardzo ważny jest zatem odpowiedni dobór urządzeń i optymalizacja ich pracy^{2,3}.

Im mniejsze pęcherzyki powietrza są wprowadzane do substratu, tym większa jest efektywność dyfuzji tlenu w danej objętości roztworu⁴. Proces aeracji można sklasyfikować wg 3 głównych kategorii wielkości pęcherzyków powietrza: napowietrzanie drobnopęcherzykowe (φ w granicach 0,03–5 mm), średniopęcherzykowe (φ 5–10 mm) i grubopęcherzykowe (φ powyżej 10 mm)⁴. Dodatkowo w literaturze można znaleźć raporty z badań nad zastosowaniem aeracji mikropęcherzykowej (φ w granicach 10–30 μ m) i nanopęcherzykowej (φ poniżej 200 nm)⁵. Przemysłowe zastosowanie aeracji mikro- i nanopęcherzykowej jest nadal w fazie eksperymentalnej, więc bardzo rzadkie są instalacje bazujące na tych procesach. Wadą mikroaeracji jest energochłonność procesu, stosowane w napowietrzaniu mikropęcherzykowym dyfuzory charakteryzują się dużym zakresem ciśnień otwarcia porów membran^{6,7}. W praktyce przemysłowej stosuje się mikroaerację w natlenianiu akwakultur. W większości przypadków wykorzystuje się dyfuzory dyskowe oraz rurowe, gumowe lub z membrany elastomerowej. Autorzy przebadali możliwość zastosowania w oczyszczaniu ścieków nowych gumowych dyfuzorów mikropęcherzykowych o ciśnieniu otwarcia 600 mB (Airprax) dla powietrza atmosferycznego. Do głównych problemów w eksploatacji dyfuzorów należy proces kolmatacji porów i zwiększania się strat hydraulicznych oraz spadek sprawności aeracji. W przypadku badanych dyfuzorów proste zabiegi mechanicznego naciągania gumy w łatwy sposób pozwalają na całkowitą dekolmatację powierzchni dyfuzora.

W oczyszczalniach z osadem czynnym oraz złożem ruchomym istotną kwestią jest cyrkulacja złoża w bioreaktorze. Klasyczne systemy napowietrzania średnio- i drobnopęcherzykowego są w stanie zapewnić warunki do sprawnej cyrkulacji osadu i kształtek złoża^{8,9}.

Napowietrzanie mikropęcherzykowe charakteryzuje się laminarnymi przepływami pęcherzyków powietrza. Bez badań hydraulicznych bardzo trudno jest zamodelować charakter pracy złoża biologicznego. Czy możliwa będzie zatem cyrkulacja osadu czynnego lub złoża ruchomego?

Przeprowadzono badania laboratoryjne ukierunkowane na oczyszczanie ścieków w skali małych oczyszczalni o przepływie do 5 m³/d. Głównym celem prac laboratoryjnych było zbadanie parametrów pracy złoża biologicznego w reaktorze SBR (*sequencing batch reactor*) oraz efektywności oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych.

Część doświadczalna

Materiały

Substrat do badań stanowiły ścieki bytowo-gospodarcze z osadnika gnilnego z przydomowej oczyszczalni ścieków przy gospodarstwie jednorodzinnym w Wieliczce. Osad czynny pobrano z komunalnej oczyszczalni ścieków w Myślenicach i był w bardzo dobrej kondycji.

Metodyka badań

Stanowisko badawcze stanowiły 2 bioreaktory laboratoryjne: SBR_p z dyfuzorem dyskowym drobnopęcherzykowym $\phi = 205$ mm i o polu powierzchni membrany 330 cm² oraz SBR_m wyposażony w 2 dyfuzory gumowe (rurowe) mikropęcherzykowe $h = 140$ mm i o polu powierzchni obu dyfuzorów 176 cm² (rys. 1).



Fig. 1. The laboratory test stand for testing wastewater treatment efficiency in SBR_p and SBR_m

Rys. 1. Stanowisko badawcze do laboratoryjnych badań efektywności oczyszczania ścieków w bioreaktorach SBR_p i SBR_m

Do każdego z bioreaktorów wprowadzano 56 L ścieków surowych i 24 L osadu czynnego. Podczas procesu aeracji z każdego bioreaktora pobierano 4 próbki ścieków co 1 h przez 10 h oraz ostatnią po 24 h procesu. Eksperyment powtórzono 4-krotnie (M1–M4 z mikroaeracją i P1–P4 z napowietrzaniem drobnopęcherzykowym). Ścieki były oczyszczane w cyklu 45 min napowietrzania i 15 min fazy beztlenowej.

W obu reaktorach monitorowano stężenie tlenu rozpuszczonego, pH oraz temperaturę. Wykonano oznaczenia wartości ChZT (každorazowo dla 4 próbek) zgodnie z normą¹⁰) i BZT₅ (každorazowo dla 2 próbek) zgodnie z normą¹¹), dla ścieków przefiltrowanych. Próbki poddano filtracji na sączkach Whatman (pory 0,4 μm). Oznaczono spektrofotometrycznie stężenia NO₃⁻, NH₄⁺ i PO₄³⁻ (analyzer Spectroquant Nova 60, Merck, procedury PB-04, 06 i 07, wydanie 2. z 10 maja 2007 r.) w ściekach surowych i po oczyszczeniu.

Wyniki poddano analizie statystycznej metodą jednoczynnikowej analizy wariancji (Anova) dla par czasowych, w programie R¹²).

Omówienie wyników

Wstępne badania hydrauliczne wykazały znacząco lepsze natlenianie ścieków oczyszczanych w bioreaktorze z mikroaeracją. Na rys. 2 wykazano różnice w prędkości przyrostu tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczanych w reaktorze z mikroaeracją w porównaniu ze ściekami oczyszczanymi w bioreaktorze z napowietrzaniem drobnopęcherzykowym. W SBR_m minimalne stężenie tlenu równe 2 mg/L uzyskano już po 2 min procesu, a po 27 min stężenie tlenu wynosiło ok. 3 mg/L. W dalszym etapie napowietrzania mikropęcherzykami odnotowano stężenie

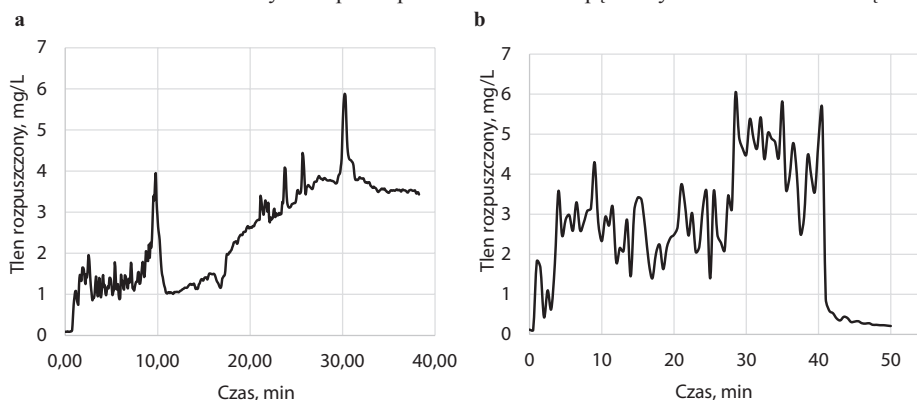


Fig. 2. The dissolved oxygen concentration curve in treated sewage in time: a) SBR_m, b) SBR_p

Rys. 2. Krzywa stężenia tlenu rozpuszczonego w ściekach w czasie: a) SBR_p, b) SBR_m

tlenu ok. 5 mg/L. Otrzymano bardzo dobre warunki dla rozwoju tlenowych mikroorganizmów heterotroficznych. W SBR_p minimalny poziom tlenu rozpuszczonego w ściekach oczyszczanych uzyskano dopiero po ok. 18 min aeracji, a stężenie 3 mg/L po 24 min aeracji. Okres efektywnego oczyszczania w tych warunkach był znacząco skrócony do połowy cyklu napowietrzania. Reaktor z mikroaeracją charakteryzowały bardzo łagodne i laminarne przepływy fazy gazowej w mieszaninie. Dyfuzor dyskowy w bioreaktorze drugim generował znaczące turbulencje, co jednak miało nieznaczny wpływ na sprawność natleniania substratu.

W pierwszych godzinach procesu oczyszczania obserwowano wzrost wartości ChZT oraz BZT₅ (rys. 3). Efekt ten był wywołany przez procesy hydrolizy, których tempo w obu przypadkach dominoowało nad procesem biodegradacji węgla organicznego¹³). W SBR_m od drugiej godziny trwania procesu obserwowano znaczące zmniejszenie ładunków organicznych, a jego tempo utrzymywało się w kolejnych godzinach na wyższym poziomie niż w SBR_p (rys. 3).

Analizy statystyczne wykazały różnice pomiędzy szybkością zmniejszania zawartości zanieczyszczeń organicznych w obu bioreaktorach. W SBR_m uzyskano znacząco lepsze efekty oczyszczania. Przeprowadzone testy wariancji jednoczynnikowej dla par czasowych wykazały statystycznie istotne różnice pomiędzy wartościami ChZT w SBR_m i SBR_p na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki testu Shapiro i Wilka również potwierdziły różnice pomiędzy parami czasowymi wyników wartości wskaźników oczyszczania w obu bioreaktorach.

Badania zawartości biogenów wskazały na wysoką sprawność usuwania jonów PO₄³⁻ i NH₄⁺ w obu bioreaktorach. W reaktorze SBR_m uzyskano średnio 81-proc., a w SBR_p ok. 68-proc. zmniejszenie stężenia fosforanów. Podobną tendencję obserwowano dla jonu NH₄⁺, którego stężenie zmniejszyło się o 67% w reaktorze SBR_m i o 45% w SBR_p (rys. 4). Lepszy profil tlenowy w SBR_m miał znaczący wpływ na intensywny proces nityfikacji i generował znacząco większe stężenia NO₃⁻ w porównaniu z SBR_p. W procesie nityfikacji azotany powstawały z azotu amonowego, dlatego większe stężenia tych jonów w SBR_m powodowały większe zmniejszenie zawartości azotu amonowego w porównaniu z SBR_p (rys. 4).

Wyniki badań jednoznacznie wykazały silne zależności między stężeniem tlenu i efektywnością procesu oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych. W literaturze^{7, 14, 15}) znaleziono wiele raportów potwierdzających uzyskane wyniki badań. Badacze zwracali jednak

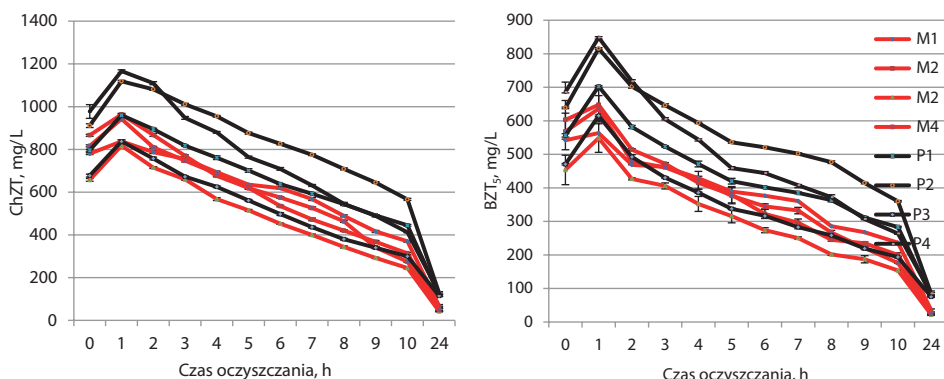


Fig. 3. COD and BOD₅ value curves in treated wastewater in time; M – microaeration SBR_m, P – finebubble aeration SBR_p

Rys. 3. Wartości ChZT i BZT₅ w oczyszczonych ściekach; M – mikroaeracja SBR_m, P – napowietrzanie drobnopęcherzykowe SBR_p

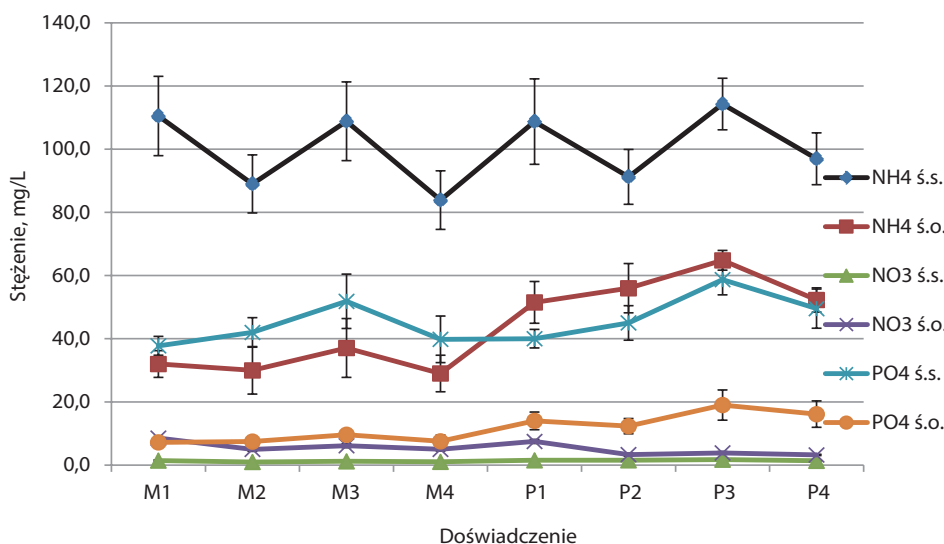


Fig. 4. Nutrients concentrations in treated wastewater (ś.s. – raw sewage, ś.o. – treated sewage); M – microaeration SBR_m, P – finebubble aeration SBR_p

Rys. 4. Stężenia biogenów w oczyszczanych ściekach (ś.s. – ścieki surowe, ś.o. – ścieki oczyszczone); M – mikroaeracja SBR_m, P – napowietrzanie drobnopęcherzykowe SBR_p

uwagę na zbyt wysokie koszty energetyczne procesu mikroaeracji w odniesieniu do uzyskanych efektów oczyszczania^{7, 14, 15}). Uzyskane wyniki nie były w stanie odpowiedzieć na pytanie, czy różnice w efektywności oczyszczania pomiędzy SBR_m i SBR_p były na tyle duże, że koszty poniesione na mikroaerację były jednak korzystniejsze niż zastosowanie napowietrzania drobnopęcherzykowego przy nieco gorszych efektach końcowych oczyszczania. Obniżenie kosztów energetycznych aeracji mikrobąblami sprawi, że te technologie konkurencyjnie zaczną wygrywać na rynku oczyszczania ścieków z tradycyjnymi systemami oczyszczania ścieków bytowych i komunalnych¹⁶⁻²⁰).

Podsumowanie

Zastosowanie napowietrzania mikro-pęcherzykowego znacząco poprawia efekt oczyszczania ścieków w czasie, a charakter samej aeracji generuje cyrkulację osadu czynnego. Korzyści odnoszone przy zastosowaniu dyfuzorów mikrobąblowych są niewątpliwie, ale niestety wymagają one wyższych nakładów energetycznych. Obniżenie ciśnienia otwarcia porów tego typu dyfuzorów stwarza nowe możliwości ich zastosowania w małych oczyszczalniach.

Otrzymano: 27-06-2019

LITERATURA

- [1] B. Holenda, E. Domokos, A. Redey, J. Fazakas, *Comput. Chem. Eng.* 2008, **32**, nr 6, 1270.
- [2] M.K. Stenstrom, R.A. Poduska, *Water Res.* 1980, **4**, nr 6, 643.
- [3] K. Svardal, H. Kroiss, *Water Sci. Technol.* 2011, **64**, nr 6, 1355.
- [4] M. Dziubiński, J. Prywer, *Mechanika płynów dwufazowych*, WNT, Warszawa 2009.
- [5] M. Matsumoto, K. Tanaka, *Fluid Dyn. Res.* 2008, **40**, nr 7-8, 546.
- [6] K. Yao, Y. Chi, F. Wang, J. Yan, M. Ni, K. Cen, *Water Sci. Technol.* 2016, **73**, nr 8, 1969.
- [7] L. Chun, Z. Lei, Y. Jingliang, G. Jianbo, L. Zaixing, *Chinese J. Environ. Eng.* 2010, **4**, nr 3, 585.
- [8] A. Srivastava, K. Agrawal, S. Sundaresan, S.R. Karri, T.M. Knowlton, *Powder Technol.* 1998, **100**, nr 2-3, 173.
- [9] P. Bugajski, K. Chmielowski, G. Kaczor, *Polish J. Environ. Stud.* 2016, **25**, nr 4, 1421.
- [10] PN-ISO 15705:2005, *Oznaczanie indeksu chemicznego zapotrzebowania tlenu (SP-ChZT)*.
- [11] EN 25813:1992, *Determination of dissolved oxygen. Iodometric method*.
- [12] R.C. Team, *R: a language and environment for statistical computing*, Vienna 2013.
- [13] A. Nowak, R. Mazur, E. Panek, E. Dacewicz, K. Chmielowski, *Phys. Chem. Earth* 2019, **109**, 40.
- [14] L. Zhang, J. Liu, C. Liu, J. Zhang, J. Yang, *Water Sci. Technol.* 2016, **74**, nr 1, 138.
- [15] A. Agarwal, W.J. Ng, Y. Liu, *Chemosphere* 2011, **84**, nr 9, 1175.
- [16] K. Chmielowski, R. Mazur, A. Nowak, D. Bedla, J. Mazurkiewicz, M. Spychała, *Polish J. Environ. Stud.* 2019, **28**, nr 4, 2099.
- [17] R. Mazur, D. Bedla, K. Chmielowski, A. Nowak, J. Mazurkiewicz, *Przem. Chem.* 2016, **95**, nr 8, 1513.
- [18] D. Młyński, K. Chmielowski, A. Młyńska, *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus* 2017, **16**, nr 1, 77.
- [19] Z. Kowalewski, E. Neverova-Dziopak, M. Preisner, *Ochr. Środ.* 2018, **40**, nr 1, 3.
- [20] Z. Kowalewski, E. Neverova-Dziopak, M. Preisner, *Ochr. Środ.* 2016, **38**, nr 3, 23.

PUBLIKACJE BEZPŁATNE • PUBLIKACJE BEZPŁATNE • PUBLIKACJE BEZPŁATNE

Na witrynie internetowej Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o. www.sigma-not.pl są udostępnione bezpłatnie publikacje zamieszczone w czasopiśmie Wydawnictwa z lat 2004–2010. W tym archiwum cyfrowym publikacje „Przemysłu Chemicznego” są dostępne bezpłatnie z lat 1986–2010 (25 roczników). Cyfrowa wersja naszego czasopisma za lata 2011–2019 jest dostępna odpłatnie, można kupić cały zeszyt w wersji cyfrowej lub poszczególne artykuły. W dostępnym archiwum cyfrowym „Przemysłu Chemicznego” znajduje się 6665 publikacji naukowych oraz pozostałe działy naszego czasopisma (Personalia, Aktualności, Konferencje, Z półki księgarskiej, Z prasy zagranicznej, Przegląd zgłoszeń patentowych i inne), łącznie ponad 35700 stron. Bezpłatne pobranie pliku PDF publikacji jest możliwe po rejestracji użytkownika. Witryna umożliwia również przeszukanie bazy publikacji wg nazwiska Autora, nazwy związku chemicznego czy słowa kluczowego. Kolejne roczniki archiwum będą udostępniane sukcesywnie. W roczniku 2019 cyfrowa wersja przedostatniego zeszytu naszego czasopisma udostępniana jest po ukazaniu się wersji papierowej zeszytu ostatniego.