

Katarzyna M. JAROMIN-GLEŃ¹ i Grzegorz ŁAGÓD¹

OCENA PRACY LABORATORYJNEGO REAKTORA TYPU SBR NA TLE ZAŁOŻEŃ PROJEKTOWYCH*

PERFORMANCE EVALUATION OF THE LABORATORY SCALE SBR ON THE BACKGROUND OF PROJECT ASSUMPTIONS

Abstrakt: Przedstawiono wyniki badań prowadzonych z wykorzystaniem reaktora typu SBR w skali laboratoryjnej, który pracował w cyklu 12-godzinnym. Eksperyment prowadzony był w stałych warunkach temperaturowych, dzięki umieszczeniu komory reaktora w łaźni stabilizowanej termicznie - przy stałej temperaturze 20°C. Artykuł przedstawia wyniki badań uzyskanych podczas próbnego rozruchu reaktora typu SBR (o całkowitej objętości 10 dm³) wraz z jego danymi technologicznymi. Wyniki zestawiono także z założeniami projektowymi oraz odniesiono do regulacji prawnych dotyczących efektów oczyszczania ścieków komunalnych. Ponadto niniejsze opracowanie porusza problem wpływu obciążenia suchej masy osadu ładunkiem zanieczyszczeń na sprawność procesu oczyszczania ścieków i jednocześnie przedstawia zauważone korelacje występujące pomiędzy skutecznością redukcji poziomu poszczególnych wskaźników zanieczyszczeń (ChZT, zawiesina ogólna, fosfor ogólny, azot ogólny, ogólny węgiel organiczny).

Słowa kluczowe: reaktor typu SBR, ścieki komunalne, sprawność oczyszczania ścieków, ChZT, zawiesina ogólna, fosfor ogólny, azot ogólny, OWO

Wstęp

Sekwencyjne reaktory porcjowe (SBR - ang. *Sequence Batch Reactor*) są odmianą technologii oczyszczania ścieków z wykorzystaniem osadu czynnego. Technologia oczyszczania ścieków z wykorzystaniem reaktorów okresowego działania znana jest od lat dwudziestych XX wieku. Zastosowanie praktyczne tego rozwiązania rozpowszechniło się głównie w Europie, Chinach oraz w Stanach Zjednoczonych i służy do oczyszczania ścieków przemysłowych oraz komunalnych, w szczególności w obszarach charakteryzujących się niskim lub zmiennym przepływem ścieków. Stąd też klasyczne rozwiązania oraz modyfikacje technologii SBR znajdują powszechne zastosowanie w mniejszych gminach wiejskich, ośrodkach wypoczynkowych, koszarach i kasynach wojskowych oraz wielu gałęziach przemysłu, np.: mleczarskim, celulozowym i papierniczym, garbarskim i tekstylnym [1-4]. W reaktorze SBR nie trzeba stosować w ciągu technicznym urządzeń do recyrkulacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz osadników wtórnych, zwykle nie stosuje się również osadników wstępnych. Konstrukcje tego typu zajmują mało miejsca i cechują się obniżonymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi [5]. W związku z wymienionymi powyżej zaletami reaktory SBR służą powszechnie do badań modelowych z wykorzystaniem zarówno ścieków rzeczywistych, jak i sztucznych (syntetycznych) czy kombinacji mieszanin (ścieki rzeczywiste z dodatkiem odcieków ze składowisk odpadów lub wód z obróbki osadów) [6-9].

Reaktory SBR mogą być zaprojektowane i eksploatowane w taki sposób, aby zapewnić zespolone usuwanie związków węgla, azotu i fosforu. Proces oczyszczania realizowany

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 43 22, email: k.m.jaromin@gmail.com

*Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'12, Zakopane, 10-13.10.2012

w układach typu SBR charakteryzuje się tym, że wszystkie główne etapy zachodzą w tym samym zbiorniku (komorze bioreakcji) w porządku sekwencyjnym. Eksploatacja SBR polega na zasadzie następujących kolejno po sobie operacji technologicznych (faz): napełnienia, reakcji, sedymentacji, dekantacji oraz ewentualnej fazy martwej. Fazy te mogą być odpowiednio modyfikowane dla różnych aplikacji operacyjnych [10-12].

Podczas rozruchu reaktora laboratoryjnego zwykle stosowane jest zaszczepienie komory osadem czynnym pobranym z pobliskiej oczyszczalni ścieków. W przypadku poboru osadu czynnego w postaci zagęszczonej odpływającej z osadnika wtórnego jako wody nadosadowe wykorzystywać można ścieki oczyszczone odprowadzane do odbiornika. Alternatywnym rozwiązaniem może być pobranie odpowiedniej ilości osadu wraz z oczyszczanymi ściekami z komory nityfikacji, gdyż mieszanina taka charakteryzuje się stosunkowo niewielkim ładunkiem zanieczyszczeń oraz zapewnia obecność azotanów do procesu denitryfikacji na początku kolejnego cyklu pracy reaktora SBR. Ostatnim elementem operacji rozruchu bioreaktora jest wprowadzenie do komory takiej ilości ścieków surowych, która będzie odpowiadała stałemu obciążeniu hydraulicznemu komory w planowanych cyklach pracy [11, 13].

Materiał i metody

Materiałem wykorzystywanym do badań były ścieki oczyszczone w laboratoryjnym reaktorze typu SBR oraz osad czynny pełniący tam rolę czynnika procesowego. Dodatkowo analizowany był osad czynny służący zaszczepieniu układu laboratoryjnego oraz ścieki po mechanicznym oczyszczeniu pobierane z komunalnej oczyszczalni ścieków „Hajdów” w Lublinie. Wyniki analiz ścieków podczyszczonych mechanicznie wprowadzanych do instalacji laboratoryjnej stanowiły punkt odniesienia i pozwoliły określić stopień redukcji poziomu zanieczyszczeń oraz sprawność analizowanego układu oczyszczającego.

Na pełne stanowisko laboratoryjne do prowadzenia procesu oczyszczania ścieków osadem czynnym w technologii porcjowej (SBR) składają się następujące elementy:

- komory reaktora,
- system mieszania: mieszadła mechaniczne, silniki elektryczne,
- system napowietrzania: dmuchawy membranowe, przewody, dyfuzory,
- system stabilizacji temperatury.

Na potrzeby laboratoryjnego układu jako komorę reaktora zastosowano szklany pojemnik z wylewem o całkowitej objętości 10 dm³ z oznaczoną skalą do 8 dm³. Pojemnik ma całkowitą wysokość $h = 0,35$ m oraz średnicę wewnętrzną $d = 0,21$ m.

Układ mieszający stanowi jedno mieszadło zbudowane z dwóch łopatek, umieszczone centrycznie w osi komory, wmontowane przy dnie komory tuż nad dyfuzorem. Mieszadła wykonane są ze stali kwasoodpornej i poruszane są przez silnik elektryczny typu wolnoobrotowego z wbudowanym reduktorem i możliwością płynnej regulacji prędkości.

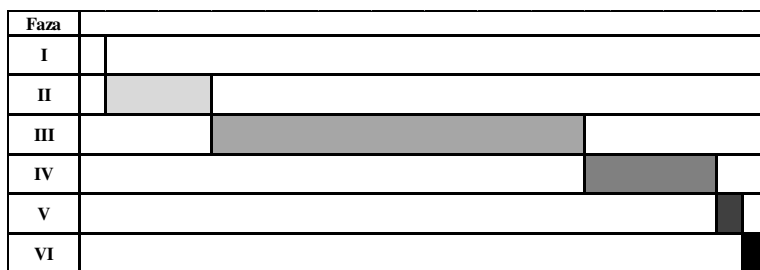
System napowietrzania obsługuje dmuchawa membranowa działająca na zasadzie tworzenia zmiennego pola elektromagnetycznego wywołującego posuwisto-zwrotny ruch pręta z magnesami i wprawia w ruch układ zaworów ssąco-tłoczących powietrze. Powietrze prowadzone jest z dmuchawy za pomocą przewodów z tworzywa sztucznego do dyfuzorów dyskowych typu średniopęcherzykowego. Strumień powietrza wprowadzany do komory

kontrolowano za pomocą rotametu z zaworem iglicowym pozwalającym na płynną regulację.

Stałą temperaturę w układzie zapewniał stabilizator temperatury, który został zaprogramowany na 20°C, działający z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Komora reaktora zanurzona była w łaźni wodnej, izolowanej za pomocą wełny mineralnej w celu łatwiejszego i energooszczędnego utrzymania zadanej wartości temperatury.

Rozruch reaktora polegał na umieszczeniu w komorze 3 dm³ osadu czynnego (pobranego z kanału recyrkulatu), zalaniu go do objętością 5,5 dm³ ściekami po oczyszczaniu biologicznym, pobranymi na wylocie z osadnika wtórnego, oraz uzupełnieniu do 8 dm³ surowymi ściekami pobranymi z osadnika wstępnego (po oczyszczaniu mechanicznym). W celu wstępnej oceny pracy reaktora ustalono obciążenie hydrauliczne komory na poziomie 5 dm³/d, dlatego przy 12-godzinnym cyklu pracy w fazie dekantacji odprowadzono 2,5 dm³ ścieków oczyszczonych, a w fazie napełniania do komory wprowadzano 2,5 dm³ ścieków surowych. Efekt próbnego rozruchu obserwowany był w ciągu 17 kolejnych cykli pracy reaktora [14]. Podczas ustalania harmonogramu pracy reaktora SBR korzystano z następujących źródeł literaturowych: [10, 15].

Cykl składał się z sześciu następujących po sobie faz (rys. 1): I - napełniania (30 minut - 4% całkowitego czasu cyklu (CCC)), II - mieszania (120 minut - 16,5% CCC), III - napowietrzania (420 minut - 58% CCC), IV - sedymentacji (90 minut - 13,5% CCC), V - dekantacji (30 minut - 4% CCC) oraz VI - faza martwa (30 minut - 4% CCC). Podczas fazy martwej pobierane były próbki osadu i oczyszczonych ścieków do analizy, zaś sam bioreaktor przygotowywany był do kolejnego cyklu pracy. W związku z powyższym badania efektów oczyszczania prowadzono dwa razy na dobę [14].



Rys. 1. Harmonogram pracy reaktora typu SBR

Fig. 1. The agenda of SBR reactor cycle work

Założony proces oczyszczania w bioreaktorze uwzględniał jednoczesne usuwanie związków węgla, azotu i fosforu, dlatego za kluczową fazę uznano napowietrzanie, warunkujące zapewnienie wymaganych warunków do prowadzenia procesów nityfikacji i defosfatacji. Podczas fazy napowietrzania stężenie tlenu rozpuszczonego utrzymywano na średnim poziomie 2 mg O₂/dm³.

Podstawę do wskazania zakresu prowadzonych badań stanowiły normy prawne określające najwyższe dopuszczalne wartości wskaźników lub minimalne procenty redukcji zanieczyszczeń w ściekach wprowadzanych do środowiska [16]. Wśród regulowanych wskaźników mierzono: chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), zawiesinę ogólną,

fosfor ogólny ($P_{og.}$), azot ogólny ($N_{og.}$). Dodatkowo obserwowano wartości ogólnego węgla organicznego (OWO) oraz wskaźniki fizyczne, takie jak stężenie tlenu rozpuszczonego, odczyn pH oraz zawartość suchej masy w osadzie. Na podstawie uzyskanych wartości stężeń zanieczyszczeń w dopływie i odpływie z komory SBR-a obliczono sprawności oczyszczania ścieków w każdym cyklu.

Pomiary stężeń ChZT, zawiesiny ogólnej, fosforu ogólnego oraz azotu ogólnego w ściekach przeprowadzono za pomocą spektrofotometru HACH DR3900 firmy HACH-Lange. Badania wykonywano zgodnie z instrukcją do testów kuwetowych podaną przez producenta. Określenie stężenia OWO wykonano z wykorzystaniem automatycznego analizatora węgla TOC-5050A firmy SHIMADZU współpracującego z dedykowanym modulem wspomagającym: ASI 5000A Autosampler.

Na podstawie uzyskanych wyników dokonano obliczeń sprawności oczyszczania ścieków za pomocą laboratoryjnego reaktora SBR zgodnie ze wzorem:

$$\eta_{usn.} = \frac{S^{dopl.} - S^{odpl.}}{S^{dopl.}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (1)$$

gdzie: $\eta_{usn.}$ - sprawność usuwania wskaźnika zanieczyszczeń [%], $S^{dopl.}$ - stężenie w dopływie do reaktora [mg/dm^3], $S^{odpl.}$ - stężenie w odpływie z reaktora [mg/dm^3].

Kolejno, znając wartość suchej masy osadu [17], przeprowadzono obliczenia obciążenia osadu czynnego według wzoru:

$$A = \frac{Q_{SBR} \cdot ChZT_{dopl.} \cdot t_R}{n \cdot V_{RP} \cdot Z_{RP} \cdot t_C} \quad [kg \text{ ChZT/kg s.m. cykl}] \quad (2)$$

gdzie: A - obciążenie [$kg \text{ ChZT/kg s.m. cykl}$], Q_{SBR} - objętość ścieków [$m^3/cykl$], $ChZT_{dopl.}$ - ładunek w dopływie do reaktora [$kg \text{ ChZT/cykl}$], t_R - czas fazy reakcji [h], t_C - czas całego cyklu [h], $n \cdot V_{RP}$ - pojemność reaktorów [m^3], Z_{RP} - stężenie osadu czynnego [$kg \text{ s.m./m}^3$].

Analizę statystyczną uzyskanych wyników, obejmującą ocenę korelacji wartości sprawności oraz obciążenia suchej masy osadu ładunkiem zanieczyszczeń, wykonano za pomocą programu Statistica PL.

Wyniki i dyskusja

Tabela 1 zawiera zestawienie sprawności obliczonych na podstawie zbadanych wartości wskaźników zanieczyszczeń wraz ze sprawnością założoną w projekcie oraz wymaganą przez rozporządzenie ministra środowiska [16]. W tabeli 1 wyróżniono kolorem szarym sprawności spełniające założenia projektowe i jednocześnie wymogi prawne, sprawności nieuwzględniane w projekcie oznaczono jako „-”, sprawności nielimitowane przez RMS oznaczono jako „*”.

Analiza zestawienia z tabeli 1, obejmującego wartości sprawności usuwania zanieczyszczeń zawartych w ściekach miejskich, pokazuje, iż proces oczyszczania w komorze reaktora SBR przy 12-godzinnym harmonogramie pracy można określić jako wysokosprawny. Odnotowano osiągnięcie wymaganych sprawności oczyszczania zarówno w stosunku do założeń projektowych, jak również wymagań prawnych dla większości analizowanych wskaźników zanieczyszczeń. Jedynie w przypadku azotu ogólnego nie

spełniono powyższych warunków. Można przyjąć, iż niska sprawność usuwania N_{og} wynika z niewystarczającej ilości dostępnego węgla organicznego niezbędnego w tym procesie, jak również ze zbyt krótkiego czasu mieszania mechanicznego, podczas którego zachodzi proces denitryfikacji. Określenie, która z przyczyn ma większy wpływ na niezadowalającą efektywność usuwania ze ścieków związków azotu, wymaga dalszych badań, np. dodatku zewnętrznego źródła węgla organicznego lub/ oraz wydłużanie czasu mieszania (fazy denitryfikacji). Analizowane wartości OWO nie są limitowane w obowiązujących aktach prawnych i nie były uwzględniane na etapie projektowym.

Tabela 1

Wartości sprawności

Table 1

Efficiency values

Wskaźnik	Sprawność [%]				
	Maksymalna	Minimalna	Średnia	Projektowana	Rozporządzenie ministra środowiska
ChZT	97	85	93	90	75
Zawiesina ogólna	99	50	92	-	90
P_{og}	98	17	93	90	90
N_{og}	78	59	67	88	85
OWO	100	46	91	-	*

Tabela 2 zawiera zestawienie współczynników korelacji dla analizowanych wskaźników zanieczyszczeń ścieków. Kolorem szarym zaznaczono w niej współczynniki korelacji uznane za istotne statystycznie oraz wyróżniono korelacje silne.

Tabela 2

Współczynniki korelacji

Table 2

Correlation coefficients

Zmienna	Obciążenie [kg ChZT/ kg s.m. cykl]	ChZT [%]	Zawiesina ogólna [%]	P_{og} [%]	N_{og} [%]	OWO [%]
Obciążenie s.m.	1,000	0,426	-0,240	0,519	0,001	-0,512
ChZT	0,426	1,000	0,367	0,264	0,206	-0,325
Zawiesina ogólna	-0,240	0,367	1,000	-0,091	0,148	-0,152
P_{og}	0,519	0,264	-0,091	1,000	0,325	-0,929
N_{og}	0,001	0,206	0,148	0,325	1,000	-0,187
OWO	-0,512	-	-0,152	-0,929	-0,187	1,000

Najwyższe istotne związki pomiędzy testowanymi grupami, sięgające $R = -0,929$ (korelacja może zostać uznana za silną), zaobserwowano dla sprawności usuwania fosforu ogólnego i OWO, należy zauważyć, iż jest to zależność o przebiegu odwrotnym, co oznacza, że wzrost wartości jednej zmiennej koreluje ze zmniejszaniem się wartości drugiej. Dodatkowo, zaobserwowano dwie korelacje wyraźne, ma to miejsce w przypadku obciążenia suchej masy osadu i OWO, przy $R = -0,512$ oraz sprawności usuwania fosforu

ogólnego i obciążenia suchej masy osadu, gdzie $R = 0,519$. W obu wymienionych przypadkach zależność można uznać za silną, ale nieistotną statystycznie.

Podsumowanie

Oczyszczanie ścieków metodą osadu czynnego z wykorzystaniem reaktorów typu SBR pozwala uzyskać wysoką sprawnością usuwania związków węgla oraz substancji biogenych. Harmonogramy pracy reaktorów SBR są indywidualnie tworzone, uwzględniając charakter i pochodzenie ścieków. W niniejszych badaniach zastosowano 12-godzinny cykl pracy laboratoryjnego reaktora SBR, który pozwalał uzyskać wysoką sprawność usuwania zanieczyszczeń wyrażanych jako ChZT i OWO, kolejno 98 i 91%, związków fosforu 93% oraz związków azotu 67%. Uzyskane średnie sprawności oczyszczania spełniają założenia projektowe i wymogi prawne, wyjątek stanowi wartość N_{og} , którego maksymalna uzyskana sprawność oczyszczania to 78%.

Zauważono istotny statystycznie związek wyrażony we współczynniku korelacji między sprawnością usuwania P_{og} a sprawnością usuwania OWO. Zaobserwowana zależność jest o przebiegu odwrotnym, $R = -0,929$. Występują nieistotne statystycznie zależności wpływu obciążenia suchej masy osadu ładunkiem zanieczyszczeń na efekt oczyszczania ścieków ze związków fosforu ($R = 0,519$) i ogólnego węgla organicznego przy $R = -0,512$.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2012-2014 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant”.

Literatura

- [1] EPA 625/R-00/008. On Site Wastewater Treatment Systems Manual: Sequencing Batch Reactor Systems; 238-242.
- [2] Ibrahim G, Abasaeed AE. Modeling of sequencing batch reactors. *Water Res.* 1995;29(7):1761-1766. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00317-Z.
- [3] Piaskowski K. The influence of operating parameters on biogenic compounds removal in the laboratory sequencing batch reactors. *Ann Set Environ Protect.* 2003;5:221-237.
- [4] Tavares de Sousa J, Gomes Miná V, Silva Lopes W, Duarte Leite V, Ferreira de Oliveira M. Treatment of wastewater using a sequencing batch reactor. *Environ Technol.* 2013;34(8):1035-1042. DOI: 10.1080/09593330.2012.733419.
- [5] Heidrich Z. Zastosowanie reaktorów sekwencyjnych w oczyszczaniu ścieków. *Przełł Komunal.* 2004;35(7):35-38.
- [6] Cotman M, Gotvajn AZ. Comparison of different physic-chemical methods for the removal of toxicants from landfill leachate. *J Hazard Mat.* 2010;178:298-305. DOI: 10.1016/j.hazmat.2010.01.078.
- [7] Elmolla ES, Chaudhuri M. The feasibility of using combined Fenon-SBR for antibiotic wastewater treatment. *Desalination.* 2012;285:14-21. DOI: 10.1016/j.desal.2011.09.022.
- [8] Datta T, Liu Y, Goel R. Evaluation of simultaneous nutrient removal and sludge reduction using laboratory scale sequencing batch reactors. *Chemosphere.* 2009;76:697-705. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.02.040.
- [9] Yang L, Wang Z, Sun Y, Hu Z, Zhai S, Wang X, et al. Influence of various operating conditions on cleaning efficiency in sequencing batch reactor (SBR) activated sludge process. Part II: Backwash and water rinsing introduced membrane filtration process. *Desalination.* 2011;272:76-4. DOI: 10.1016/j.desal.2011.01.003.
- [10] Belia E, Smith PG. The bioaugmentation of sequencing batch reactor sludges for biological phosphorus removal. *Water Sci Technol.* 1997;35(1):19-26.

- [11] Fernandes H, Jungles MK, Hoffmann H, Antonio RV, Costa RHR. Full-scale sequencing batch reactor (SBR) for domestic wastewater: Performance and diversity of microbial communities. *Bioresour Technol.* 2013;132:262-268. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.01.027.
- [12] Rim YT, Yang HJ, Yoon CH, Seo JB, Ryu JR, Shin EB. A full-scale test of a biological nutrients removal system using the SBR activated sludge process. *Water Sci Technol.* 1997;35(1):241-247. DOI: 10.1016/S0273-1223(96)00902-X.
- [13] Kauser J, Shamia H, Tariq A. Activated sludge and other suspended culture processes. *Water Environ Res.* 2012;84(10):1029-1080. DOI: 10.2175/106143012X13407275694798.
- [14] Szaja A, Łagód G, Jaromin-Gleń KM. The effect of bioaugmentation on oxygen uptake rate in sequencing batch reactor. 5th IWA Eastern European Young and Senior Water Professional Conference. 26-28 June 2013, Kiev, Ukraine, 510-516.
- [15] Umble AK, Ketchum LH. A strategy for coupling municipal wastewater treatment using the Sequencing Batch Reactor with effluent nutrient recovery through aquaculture. *Water Sci Technol.* 1997;35(1):177-184. DOI: 10.1016/S0273-1223(96)00894-3.
- [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (DzU 2006.137.984 z póź. zm.).
- [17] PN-EN 12879:2004 - Charakterystyka osadów ściekowych - Oznaczanie strat przy prażeniu suchej masy osadu.

PERFORMANCE EVALUATION OF THE LABORATORY SCALE SBR ON THE BACKGROUND OF PROJECT ASSUMPTIONS

Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

Abstract: The paper presents the results of analyzes carried out on the laboratory scale SBR reactor, which worked at a 12 hour schedule. The experiment was conducted at the constant thermal conditions by placing the reactor chamber in a stabilized bath temperature - at a const temperature of 20°C. Proposed article presents the results of test run of the reactor SBR on a laboratory scale (total volume of 10 dm³) with its technological data. The results obtained relative to the project assumptions and legal regulations concerning the quality of wastewater treatment. Study raises also the problem of the impact of pollutants load onto volatile solids (F/M food to mass ratio) on the quality of wastewater treatment. Furthermore paper shows the observed correlations which exist between the removal efficiency of various pollutant indicators (COD, TSS, total phosphorus, total nitrogen, TOC).

Keywords: SBR reactors, municipal sewage, purification efficiency, COD, TSS, total phosphorus, total nitrogen, TOC

