

Zastosowanie wolnoobrotowego systemu mieszania w sekwencyjnych bioreaktorach porcjowych z osadem czynnym

Application of an slow-speed mixing system in Sequencing Batch Reactors with activated sludge

Jacek Zaboruko, Joanna Szulzyk-Cieplak, Marcin K. Widomski, Grzegorz Łagód^{*)}

Słowa kluczowe: bioreaktor, SBR, ścieki, proces oczyszczania ścieków, mieszanie, osad czynny.

Streszczenie

Zaostrzające się wymogi, dotyczące jakości ścieków odprowadzanych do odbiornika, doprowadziły do opracowania wielu urządzeń wykorzystywanych podczas biologicznego oczyszczania. Obecne badania prowadzone w sektorze wodno-ściekowym skupiają się często na poszukiwaniu efektywnych energetycznie rozwiązań technicznych i technologicznych, wywierających jak najmniej negatywny wpływ na środowisko, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów eksploatacyjnych. W systemach oczyszczania powszechnie wykorzystuje się właściwości struktur mikroorganizmów w postaci kłaczków osadu czynnego, które usuwają organiczne i biogenne związki zawarte w ściekach. Ważnym elementem powyższego rozwiązania jest zastosowanie układu mieszania i napowietrzania bioreaktorów w odpowiedniej konfiguracji. W oczyszczalni ścieków, z częścią biologiczną, działającą w technologii SBR, stosuje się wiele rodzajów urządzeń do mieszania. W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie innowacyjnego wolnoobrotowego systemu mieszania w sekwencyjnych bioreaktorach porcjowych, w których czynnikiem procesowym jest osad czynny.

Keywords: bioreactor, SBR, wastewater treatment processes, mixing, homogenization, activated sludge

Abstract

Increasing demands on the quality of wastewater discharged to the receiving water have led to the development of many biological treatment devices. Current research in the water and wastewater sector often focuses on finding energy-efficient solutions that have the least negative impact on the environment while reducing operating costs. In wastewater treatment systems, it is common to utilize the properties of microbial structures in the form of activated sludge flocs that remove organic compounds and biogenic contained in wastewater. An important part of the solution is the mixing and aeration system configuration used. In the treatment plant operating in the SBR technology, there are many types of mixing devices that are used in the process of wastewater treatment. This paper presents the application of an innovative slow-speed mixing system in sequential batch bioreactors in which activated sludge is a process factor.

1. Wstęp

Jednym z kluczowych obszarów technologicznych, mającym znaczenie dla rozwoju kraju, jest gospodarka wodno-ściekowa. Nabiera ona szczególnego znaczenia w obliczu uwidaczniających się zmian klimatycznych i widocznych na świecie oznak długotrwałej suszy. Kraje Unii Europejskiej zobowiązane zostały do spełnienia wymagań, w zakresie dostosowania obowiązujących przepisów prawnych w wielu obszarach, w tym dotyczących gospodarki ściekowej. Jednym z najważniejszych źródeł prawa unijnego, regulujących warunki oczyszczania ścieków, jest dyrektywa Rady 91/271/EWG [10], dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych z podwyższonym standardem usuwania biogenów w aglomeracjach powyżej 10000 RLM (Równoważna Liczba Mieszkańców). Regulacja ta spowodowała konieczność intensyfikacji działań w tym sektorze gospodarki, w zakresie modernizacji istniejących

oczyszczalni ścieków komunalnych oraz wdrażania nowoczesnych technologii bazujących na metodach biologicznych [6,7,9]. Badania we wspomnianym zakresie skupiają się na poszukiwaniu skutecznych i efektywnych energetycznie rozwiązań, tak by z jednej strony zapewnić wymagane standardy oczyszczania ścieków, a z drugiej sprzyjać obniżeniu kosztów eksploatacyjnych. Jednocześnie dąży się do zwiększania niezawodności urządzeń, co determinuje stosowanie innowacyjnych metod pracy przy projektowaniu i konstruowaniu nowych rozwiązań technicznych [25].

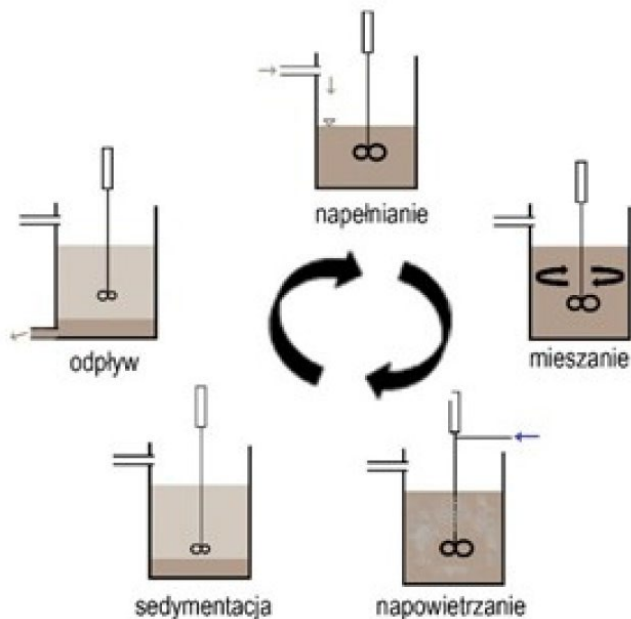
2. Wprowadzenie

Biologiczne procesy oczyszczania ścieków, realizowane w nowoczesnych oczyszczalniach, bazują na naturalnej zdolności samooczyszczania mikroorganizmów występujących w zbiornikach

^{*)} Jacek Zaboruko, mgr inż., Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, j.zaboruko@pollub.pl, Joanna Szulzyk-Cieplak, dr inż., Politechnika Lubelska, Wydział Podstaw Techniki, Katedra Podstaw Techniki, Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin, j.szulzyk-cieplak@pollub.pl, Marcin K. Widomski, dr hab. inż. prof. PL, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, m.widomski@pollub.pl, Grzegorz Łagód, dr hab. inż. prof. PL, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, g.lagod@pollub.pl

wodnych. W wyniku obserwacji i intensyfikacji naturalnych procesów, metody biologiczne oczyszczania wdrożono w warunkach technicznych, w których jako czynnik procesowy wykorzystuje się odpowiednio ukształtowany materiał biologiczny, na przykład osad czynny w postaci kłaczkowatej zawiesiny [5,11]. Osad czynny jest złożonym ekosystemem w skład którego wchodzi organizmy prokariotyczne i eukariotyczne, a prawidłowa realizacja procesu oczyszczania możliwa jest tylko w przypadku istnienia odpowiedniej biocenozy tych organizmów. Kłaczki osadu czynnego stanowią sflokulowaną masę mikroorganizmów i polimerów zewnątrzkomórkowych EPS (ang. Extracellular Polymeric Substances) oraz zaadsorbowaną materię organiczną i materiał mineralny. Kłaczki charakteryzują się wieloma parametrami, wśród których wymienić należy właściwości reologiczne i odporność na oddziaływanie naprężeń ścinających. Wspomniane parametry w dużej mierze odpowiedzialne są za strukturę oraz determinują właściwości fizyczne osadu czynnego, w tym jego sedymentację [14]. W żywej zawieszynie osadu zachodzą nieprzerwanie procesy fizyczne i biochemiczne, prowadzące do przekształcania związków biogenych i organicznych w wodę, produkty gazowe i własną biomasę oraz substancje zapasowe organizmów [3,4,8].

Jednym z wariantów technologii oczyszczania ścieków, w którym zaadaptowano i wykorzystano osad czynny, jest sekwencyjny reaktor porcjowy [3,18]. W bioreaktorach tych w trakcie oczyszczania ścieków, procesy zachodzą kolejno w jednym zbiorniku i składają się z następujących po sobie cykli, trwających zazwyczaj od kilku do kilkunastu godzin. Bioreaktor pracując w sposób cykliczny, obejmuje kilka następujących po sobie faz: tj. napełnianie, mieszanie, napowietrzanie, sedymentację i dekantację, a elastyczność jego pracy pozwala na dokonywanie zmian i regulacji parametrów operacyjnych [15].

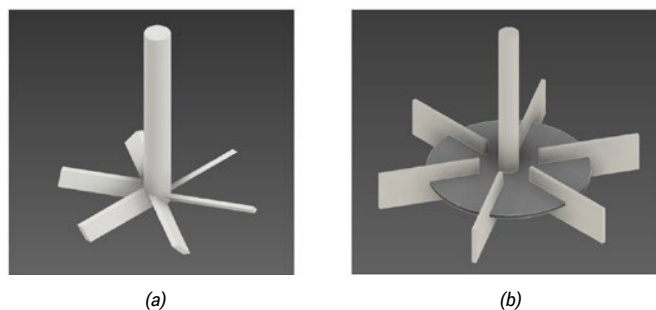


Rys. 1. Schemat sekwencji faz procesowych podczas działania reaktora SBR [15]
 Fig. 1. Scheme of the sequence of process phases during operation of the SBR reactor

W celu zapewnienia odpowiednich warunków dla organizmów prowadzących procesy biochemiczne, w trakcie fazy mieszania musi być zapewniona homogenizacja objętości bioreaktora [21,22,24]. Właściwie dobrane parametry systemu mieszania i napowietrzania w bioreaktorach SBR poprawiają strukturę kłaczek, wpływając na ich zdolność sedymentacyjną [1,13,27]. Podczas fazy mieszania nie występuje natlenianie układu, co skutkuje

powstaniem warunków anoksycznych, sprzyjających procesowi denitryfikacji azotanów pozostałych po poprzednim cyklu pracy reaktora a następnie warunków beztlenowych. Po wyłączeniu systemu mieszania i napowietrzania rozpoczyna się faza sedymentacji i klarowania ścieków. Następuje oddzielenie osadu od ścieków oczyszczonych, pozwalające na dekantację cieczy nadosadowej (ścieków oczyszczonych).

Do mieszania zawartości układów jedno – i wielofazowych w ruchu turbulentnym stosuje się zwykle mieszadła o stosunkowo małych średnicach $D/T = 0,25 \div 0,5$. W zależności od rodzaju użytego mieszadła mechanicznego, w zbiorniku bioreaktora występuje złożony charakter ruchu w przestrzeni, w skład którego wchodzi ruchy wzdłuż promienia zbiornika i osiowy, równoległy do osi obrotu mieszadła. Najczęściej stosowanymi typami mieszadeł są turbiny łopatkowe, z nachylonymi pod kątem łopatkami (rys. 2a) oraz wirniki tarczowe z łopatkami umieszczonymi prostopadłe do płaszczyzny obrotu, nazywane turbinami Rushtona (rys. 2b) [23]. Wirniki takie wymagają dużej mocy na wale silnika i generują duży promieniowy strumień cieczy wyrzucany ze strefy wirnika w stronę ściany zbiornika, powodując nadmierne rozrywanie kłaczek osadu czynnego oraz nie umożliwiając zgarniania opadających cząsteczek stałych z dna zbiornika oraz ich transportu do poziomu zwierciadła cieczy.



Rys. 2. (a) mieszadło łopatkowe, (b) turbina Rushtona (opracowanie własne na podstawie [23])

Fig. 2. (a) bladed mixer, (b) Rushton turbine (own elaboration based on [23])

Preferowane rozwiązanie stanowi więc system mieszania i napowietrzania, charakteryzujący się wysoką wydajnością i niskim zużyciem energii, który z jednej strony powoduje pełną homogenizację zawartości bioreaktora a z drugiej nie rozrywa ani nie rozdrabnia w inny sposób kłaczek osadu czynnego.

Istnieje wiele rodzajów urządzeń do wolnoobrotowego mieszania, które mogą być wykorzystywane w procesie oczyszczania ścieków. Głównym celem takich urządzeń jest zwiększenie aktywności biologicznej materii organicznej i uzyskanie jednolitej biomasy. Zapewnienie warunków wspierających wzrost organizmów żywych, można osiągnąć poprzez zastosowanie odpowiednio dobrane mieszadła, prowadzącego do wytworzenia w mieszaninie właściwych warunków hydraulicznych i tlenowych, poprzez odpowiednią intensywność mieszania, prowadzącą do uzyskania wymaganej intensywności turbulencji mieszaniny zawieszony wewnątrz zbiornika. Wytworzenie homogenicznej mieszaniny przekłada się na dostarczenie materii żywej substratów oraz zapewnienie stabilnych warunków temperaturowych, koniecznych do wzrostu aktywnej biomasy [3].

Mieszadła wolnoobrotowe, przeznaczone do mieszania zawartości zbiorników o różnej lepkości, mają na celu zapewnić lepszą cyrkulację osiową. Urządzenia mieszające, w obecnym stanie techniki, składają się z co najmniej dwóch części. Pierwszą część stanowi obudowa lub rura, przez którą mogą przepływać zmieszane materiały. Drugą częścią jest oddzielny element, zawierający najczęściej spiralne wstęgi zewnętrzne i wewnętrzne

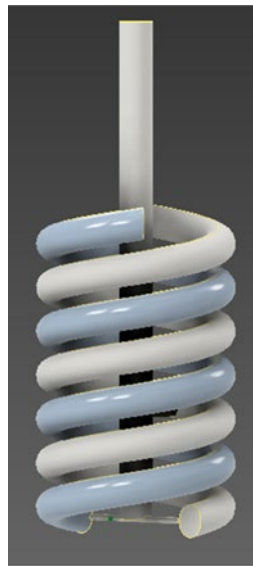
ne. Wstęgi zewnętrzne mają kształty rozciągniętych w kierunku prostym do płaszczyzn zwojów, spiral Archimedes, zaś wstęgi wewnętrzne mają przeciwny skręt do wstęg zewnętrznych, przebiegają wzdłuż linii śrubowych, o skoku kilkakrotnie większym niż wstęgi zewnętrzne i mają nie więcej niż połowę zwojów wstęg zewnętrznych [12,17]. Innym znanym rozwiązaniem mieszadła jest urządzenie do homogenizacji, o konstrukcji wielohelikarno-wstęgowej, z rozmieszczeniem gwiazdowym. Urządzenie składa się z bębna i mechanizmu homogenizującego umieszczonego w cylindrze którym uformowany jest otwór zasilający i wylotowy. Urządzenie charakteryzuje się tym, że mechanizm homogenizujący zawiera centralny zespół mieszający ze śrubową wstęgą oraz obwodowe zespoły mieszające o podobnej konstrukcji. W warunkach roboczych, centralny zespół mieszający obraca się, a obwodowe zespoły mieszające otaczają środkowy zespół mieszający, obracając się podczas obracania zespołu centralnego. Obracanie do przodu lub do tyłu spiralnych wstęg może być dowolnie przełączane [23].

Z przedstawionych powyżej informacji wynika, że w przypadku projektowania systemów mieszających w bioreaktorach z osadem czynnym, niezwykle ważnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniej konstrukcji układu mieszania, która zapewni wysoki stopień homogenizacji osadu czynnego i ścieków w objętości bioreaktora, przy jednoczesnym zapewnieniu jak najniższej energochłonności procesu. Cel ten można osiągnąć wykorzystując w fazie projektowania metody modelowania komputerowego [16,19]. Modelowanie CFD (Computational Fluid Dynamics) pozwala prognozować, które zmiany w projektowanym układzie zwiększą wydajność lub poprawią wybrane parametry pracy reaktora, bez konieczności modyfikowania systemów fizycznych. Z ekonomicznego punktu widzenia, zasadne jest stosowanie symulacji komputerowych, ponieważ pozwala to na zaprojektowanie i wstępne przetestowanie nowych konstrukcji poprzez analizę obiektów wirtualnych, eliminując konieczność budowy wielu fizycznych prototypów urządzenia [2]. W efekcie prac symulacyjnych może zostać przygotowany i wstępnie zweryfikowany zestaw rozwiązań konstrukcyjnych, skracający czas prowadzenia większej liczby doświadczeń w warunkach rzeczywistych, zaś otrzymane wyniki można zaprezentować w różnych formatach lub przygotować do wykorzystania w skali laboratoryjnej, na przykład w procesie drukowania 3D.

Możliwości jakie oferowane są przez technologie wytwarzania przyrostowego, pozwalają na znaczną swobodę uzyskanie pożądanego efektu końcowego, w zakresie budowy modeli z materiałów kompozytowych. Szczegółowość odwzorowywania modeli, którą można uzyskać za pomocą druku 3D, stała się szczególnie pożądana w wielu zastosowaniach, począwszy od biomedycyny po specyficzne zastosowania w obszarze inżynierii środowiska. Nabiera on coraz większego znaczenia w zastosowaniach przemysłowych, ze względu na zalety, takie jak uzyskanie potencjalnie lekkich konstrukcji przez tworzenie usieciowanych wewnętrznie struktur przestrzennych, możliwość recyklingu filamentów oraz zapewnienie odpowiednich parametrów mechanicznych. Technika druku 3D pozwala również na swobodę wytwarzania dość skomplikowanych kształtów, nieosiągalnych tradycyjnymi metodami, przy zachowaniu niewielkich kosztów [26].

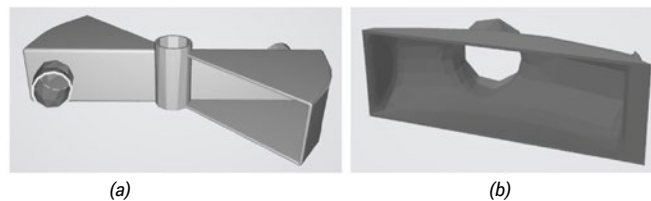
3. Innowacyjny system mieszania wolnoobrotowego

Mając na uwadze analizę stanu techniki podjęto prace, których istotą jest dobór parametrów konstrukcyjnych i hydrodynamicznych układu mieszania i zapewnienie wysokiego poziomu niskonakładowej homogenizacji osadu czynnego i ścieków w objętości reaktora. W efekcie opracowano układ mieszania ścieków, osadu czynnego i wód nadosadowych w bioreaktorach SBR jako wolnoobrotowe mieszadło wstęgowe w kształcie helisy (rys. 3) [20].



Rys. 3. Model 3D mieszadła (opracowanie własne)

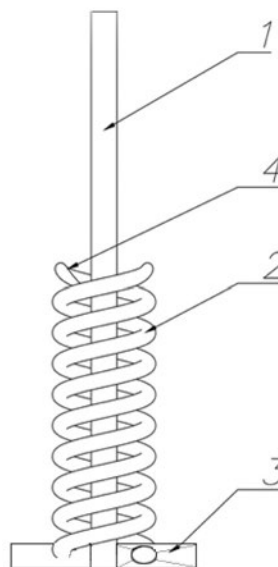
Fig. 3. 3D model of the mixer (own elaboration)



Rys. 4. (a) Model 3D układu pary zgarzniaczy, (b) Pojedynczy zgarzniacz (opracowanie własne)

Fig. 4. (a) 3D model of pair of scrapers, (b) single scraper (own elaboration)

Centralny zespół roboczy i obwodowe zespoły mieszające otaczające środkowy zespół mieszający, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat układu mieszadła (opracowanie własne)-opis w tekście

Fig. 5. Schematic of the mixer system (own elaboration) – description in the text

Działanie mieszadła polega na tym, że obraca się ono ruchem wolnoobrotowym wokół osi wału centralnego (1). Zamocowane w dolnej części uchwytu (1) wyprofilowane zgarzniacze (3) zgarniają cząsteczki stałe (kłaczkosy osadu czynnego) z dna zbiornika, a następnie poprzez zapewnienie odpowiednich warunków hydraulicznych są podnoszone do góry za pomocą przymocowanych do zgarzniacza zwiniętych spiralnie wokół uchwytu wstęg (2). Kłaczkosy osadu czynnego są równomiernie rozpraszane w pobliżu

zwierciadła cieczy za pomocą dyfuzorów (4) „przymocowanych do górnych otworów wstęp. Rozproszone kłaczkosady opadają grawitacyjnie, a wolnoobrotowy ruch mieszadła i praca zgarniaczy pozwała na ich równomierne wymieszanie ze ściekami.

Skutkiem zastosowania takiego układu mieszającego jest to, że zapewnia on wysoki stopień podnoszenia medium z dna zbiornika, minimalizując opory i straty energii. Najbardziej celowe wydaje się zastosowanie tego typu rozwiązań w reaktorach z osadem czynnym, których wysokość jest znaczna – większa od szerokości. Wstępne badania laboratoryjne oraz w skali półtechnicznej wykazały, że opisywane mieszadła szczególnie dobrze sprawują się w reaktorach o kształcie cylindrycznym.

4. Podsumowanie

W celu zapewnienia homogenizacji objętości zawartości bioreaktorów z osadem czynnym, a w szczególności eksploatowanych jako sekwencyjne reaktory porcjowe, stosować można różne rozwiązania konstrukcyjne systemów mieszających. Ważne jest przy tym aby cechowały się one skutecznością w ujednoczeniu objętości zbiornika, niezawodnością oraz jak najniższymi kosztami eksploatacyjnymi – powiązаныmi najczęściej z zapotrzebowaniem na energię elektryczną systemów napędzających mieszadła. Systemy mieszające nie powinny również powodować w trakcie mieszania zbytniego rozbijania i rozdrabniania kłaczek osadu gdyż pogarsza to własności sedymentacyjne oraz zimniejsza klarowność oczyszczonych ścieków. Zaproponowane rozwiązanie może posłużyć do dalszego prowadzenia badań nad energochłonnością procesu oczyszczania ścieków, wpływem warunków hydraulicznych na kształt oraz wielkość kłaczek, możliwościami intensyfikacji powstawania osadu granulowanego oraz zmianami następującymi w składzie gatunkowym zbiorowisk organizmów osadu czynnego. Zaproponowane rozwiązanie może również być stosowane w niewielkich oczyszczalniach, bazujących na bioreaktorach typu SBR, w których stosowany dotychczas system mieszania nie zapewniał dostatecznej homogenizacji, czy też powodował nadmierne rozdrabnianie kłaczek osadu. ■

LITERATURA

- [1] Ahiablame, L.M.; Engel, B.A.; Chaubey, I. 2013. „Effectiveness of Low Impact Development Practices in Two Urbanized Watersheds: Retrofitting with Rain Barrel/Cistern and Porous Pavement”. *Journal of Environmental Management* 119:151–161.
- [2] Alizadeh, M.; Sadrameli, S.M. 2018. „Numerical Modeling and Optimization of Thermal Comfort in Building: Central Composite Design and CFD Simulation”. *Energy and Buildings* 164:187–202.
- [3] Babko, r.; Jaromin-Gleń, K.; Łagód, G.; Danko, Y.; Kuzmina, T.; Pawłowska, M.; Pawłowski, A. 2017. „Short-Term Influence of Two Types of Drilling Fluids on Wastewater Treatment Rate and Eukaryotic Organisms of Activated Sludge in Sequencing Batch Reactors”. *Journal of Environmental Quality* 46:714–721.
- [4] Babko, r.; Kuzmina, T.; Jaromin-Gleń, K.; Bieganowski, A. 2015. „Bioindication Assessment of Activated Sludge Adaptation in a Lab-Scale Experiment”. *Ecological Chemistry and Engineering S* 21:605–616.
- [5] Błaszczak, M.K. 2019. „Biologiczne Aspekty Oczyszczania Ścieków”. *Wydawnictwo Naukowe PWN*
- [6] Bodington, V. 2009. „Cardiff Wwtw Aeration Optimisation Through Scientific Control”. Strathkelvin Instruments Ltd.: Glasgow, UK
- [7] Cieków, B.O.Ś.; Godniok, M.; Korczak, K.; Zdebek, D.; Cieków, B.O.Ś. 2010. „Methodical Aspects of Analysis of Respiratory Activity of Microorganisms in the Activated Sludge, in Reference to the Possibility of Biological Treatment Plant Work Optimization”. *Główny Instytut Górnictwa* 1:5–15.
- [8] Cydzik-Kwiatkowska, A.; Zielińska, M. 2016. „Bacterial Communities in Full-Scale Wastewater Treatment Systems”. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 32:1–8.
- [9] Drewnowski, J.; Remiszewska-Skwarek, A.; Duda, S.; Łagód, G. 2019. „Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization”. *Processes*, 7 (5)
- [10] European Commission Council Directive of 21 May 1991 „Concerning Urban Waste Water Treatment (91/271/EEC)”. *Official Journal of the European Communities*, 269:40–52.
- [11] Fiałkowska, E.; Fyda, J.; Pajdak-Stoś, A.; Wiąckowski, K. 2010. „Osad Czynny, Biologia i Analiza Mikroskopowa”. *Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. Z o. o.*
- [12] Halidan, M.; Chandratilleke, G.R.; Dong, K.J.; Yu, A.B. 2018. „Mixing Performance of Ribbon Mixers: Effects of Operational Parameters”. *Powder Technology* 325:92–106.
- [13] Makowska, M.; Maciejewska, E. 2017. „Effect of Aeration Time on the Operation of SBR and SBBR Reactor”. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus* 15:105–116.
- [14] Nielsen, P.H.; Thomsen, T.R.; Nielsen, J.L. 2004. „Bacterial Composition of Activated Sludge – Importance for Floc and Sludge Properties”. *Water Science and Technology* 49:51–58.
- [15] Piaskowski, K. 2003. „Wpływ Parametrów Procesowych Na Usuwanie Związków Biogenych w Laboratoryjnym Reaktorze Typu SBR”. *Rocznik Ochrona Środowiska* 5:221–237.
- [16] Pittoors, E.; Guo, Y.; Van Hulle, S.W.H. 2014. „Modeling Dissolved Oxygen Concentration for Optimizing Aeration Systems and Reducing Oxygen Consumption in Activated Sludge Processes: A Review”. *Chemical Engineering Communications* 201:983–1002.
- [17] Robinson, M.; Cleary, P.W. 2012. „Flow and Mixing Performance in Helical Ribbon Mixers”. *Chemical Engineering Science* 84:382–398.
- [18] Singh, M.; Srivastava, r.K. 2011. „Sequencing Batch Reactor Technology for Biological Wastewater Treatment: A Review”. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 6:3–13.
- [19] Sytek-Szmeichel, K.; Podedworna, J.; Zubrowska-Sudol, M. 2016. „Efficiency of Wastewater Treatment in SBR and IFASMB/SBBR Systems in Specified Technological Conditions”. *Water Science and Technology* 73:1349–1356.
- [20] Szulzyk-Cieplak J., Łagód G., Zaboruko J. 2021. Mieszadło do wolnoobrotowego mieszania i homogenizacji w zbiornikach pionowych, zwłaszcza z osadem czynnym. Numer zgłoszenia patentowego A1 438578, zgłoszony 23.07.2021 i wydany 20.12.2021. <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.438578>
- [21] Tang, M.; Liu, J. 2019. „Aeration Optimization of Large-Scale Membrane Bioreactors in a Sewage Treatment Plant”. *Water Practice and Technology* 14:198–202.
- [22] Traoré, A.; Grieu, S.; Puig, S.; Corominas, L.; Thiery, F.; Polit, M.; Colprim, J. 2005. „Fuzzy Control of Dissolved Oxygen in a Sequencing Batch Reactor Pilot Plant”. *Chemical Engineering Journal* 111:13–19.
- [23] Yang, F.; Zhang, C.; Li, M. 2020. „Experimental Study on Mixing Characteristics of Flexible-Blade Rushton Impeller”. *Huagong Xuebao/CIESC Journal* 71:626–632.
- [24] Zaborowska, E.; Majtacz, J.; Drewnowski, J.; Sobotka, D.; Al-Hazmi, H.; Kowal, P.; Makinia, J. 2018. „Improving the Energy Balance in Wastewater Treatment Plants by Optimization of Aeration Control and Application of New Technologies”. *Water Supply and Wastewater Disposal*; Politechnika Lubelska: Lublin, Poland 317–328.
- [25] Zaboruko, J.; Głowienka, r.; Widomski, M.K.; Szulzyk-Cieplak, J.; Babko, r.; Łagód, G. 2020. „Modeling of the aeration system of a sequencing batch reactor”. *Journal of Ecological Engineering* 21:249–256.
- [26] Zaboruko, J.; Urzędowski, A.; Szulzyk-Cieplak, J.; Trnik, A.; Suchorab, Z.; Łagód, G. 2021. „Analysis of Thermal Operating Conditions of 3D Printers with Printing Chamber”. *In Proceedings of the AIP Conference Proceedings* 2429
- [27] Zhang, Y.; Li, C.; Xu, Y.; Tang, Q.; Zheng, Y.; Liu, H.; Fernandez-Rodriguez, E. 2019. „Study on Propellers Distribution and Flow Field in the Oxidation Ditch Based on Two-Phase CFD Model”. *Water* 11 (12).