



Dobór parametrów konstrukcyjnych rotacyjnego złoża biologicznego metodą znacznikową

Joanna Szulżyk-Cieplak, Aneta Duda, Klaudiusz Lenik
Politechnika Lubelska

1. Wstęp

Poziom infrastruktury w zakresie gospodarki ściekowej w Polsce jest wciąż niezadowolający, zwłaszcza na obszarach gmin wiejskich (Szulżyk-Cieplak i in. 2015). Duże rozproszenie zabudowy wymusza konieczność budowy długich kolektorów tranzytowych do zbiorczych oczyszczalni ścieków lub zastosowanie grupowych oczyszczalni lokalnych. Wymienione rozwiązania, z uwagi na wysokie nakłady inwestycyjne w przeliczeniu na jednostkę uzyskanej przepustowości, są nieefektywne ekonomicznie i energetycznie. Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie niekonwencjonalnych systemów, do których należy system jednoczesnego odprowadzania i oczyszczania ścieków z rotacyjnym złożem biologicznym (Duda i in. 2014).

Rotacyjne złoża biologiczne (RBC) są stosowane w oczyszczaniu zarówno ścieków bytowych, jak i przemysłowych. Stanowią alternatywną do konwencjonalnej metody osadu czynnego technologię oczyszczania ścieków (Patwardhan 2003, Ghawi i in. 2009, Pathan i in. 2015). Efektywność biodegradacji w złożach obrotowych uzależniona jest od zawartości tlenu rozpuszczonego w ściekach, natężenia przepływu ścieków, zawartości związków organicznych, prędkości obrotowej elementu ruchomego złoża oraz konfiguracji układu (Waskar i in. 2012, Mba i in. 2007, Celenza 1999, Pradeep i in. 2011, Borghi i in. 1985). Istotnym parametrem decydującym o wydajności obrotowych złóż biologicznych jest czas retencji, będący miarą średniej długości czasu zatrzymania w reaktorze przepływają-

cej przez niego masy. Zwiększenie czasu retencji przekłada się na wzrost efektywności degradacji zanieczyszczeń (Calenza 1999).

Biologiczne złoże rotacyjne o dwukierunkowym wzdłużnym przepływie stanowi nowatorskie rozwiązanie w zakresie konstrukcji złożeń obrotowych. (Lenik i in. 2015). Rotor – główny element urządzenia – zapewnia korzystne warunki napowietrzające do zasiedlania przez mikroorganizm, jak również służy jako ruchome złoże biologiczne. Celem prowadzonych badań była ocena parametrów konstrukcyjnych rotora w aspekcie zapewnienia efektywnej jego pracy.

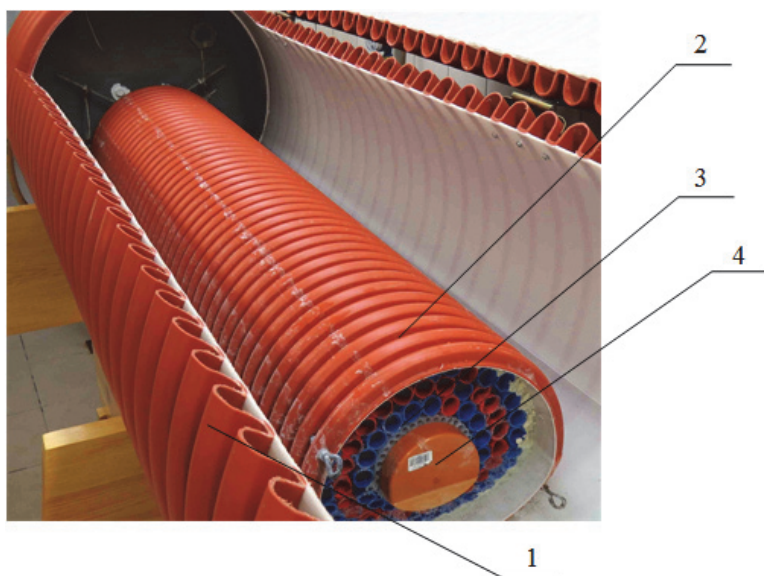
2. Materiały i metody badawcze

Istotą podjętych prac była analiza i ocena wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych urządzenia na czas retencji przepływającego przez złoże medium. W celu wyboru układu, dla którego czas retencji cieczy przez złoże jest najdłuższy, przeprowadzono badania metodą znacznikową dynamiki przepływu przez urządzenie dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych rotora oraz porównano pracę rotora w przypadku obrotów lewoskrętnych i prawoskrętnych.

2.1. Rotacyjne złoże biologiczne o dwukierunkowym wzdłużnym przepływie

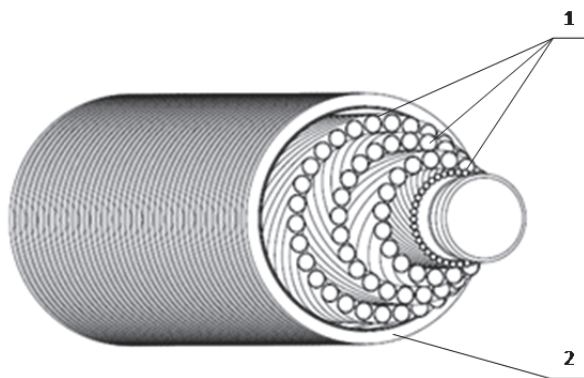
Złoże rotacyjne o dwukierunkowym wzdłużnym przepływie (fot. 2.1) umieszczone jest w wykonanym z żywicy poliestrowej zbiorniku (1). Podstawowym elementem złożeń jest rotor (2) zbudowany z wielu warstw karbowanych rur typu peszel (3) nawiniętych cylindrycznie wokół jego osi, w której usytuowany jest pływak (4).

Wykorzystując metodę MES dobrano konstrukcję rotora, a w szczególności kąty nawinięcia peszli o zmiennym kierunku i zwrocie, co zapewniło założony przepływ i napowietrzenie medium (Duda i in. 2014, Lenik i in. 2013). Nawinięcie peszli (rys. 1) pozwala na dwukierunkowy przepływ medium płynnego. Przepływ w warstwach jest naprzemienny, tzn. gdy ciecz w pierwszej warstwie płynie w jednym kierunku, to w następnej warstwie kierunek jej przepływu jest przeciwny.



Fot. 1. Model laboratoryjny złoza rotacyjnego o dwukierunkowym wzdłużnym przepływie: 1 – obudowa złoza, 2 – rotor, 3 – układ karbowanych rur (peszli), 4 – pływak

Photo 1. Laboratory model of a rotating biological contactor with bidirectional longitudinal flow: 1 – housing, 2 – rotor, 3 – corrugated pipes, 4 – float

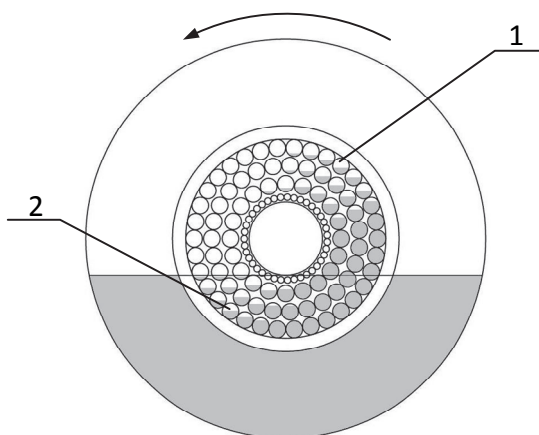


Rys. 1. Układ peszli w rotorze o dwukierunkowym wzdłużnym przepływie: 1 – cylindrycznie nawinięte warstwy peszli, 2 – obudowa rotora

Fig. 1. The arrangement of corrugated pipes in a bi-directional longitudinal flow rotor: 1 – cylindrically wound layers of corrugated pipes, 2 – rotor housing

Peszle pełnią podwójne zadanie: zapewniają napowietrzanie osadu czynnego oraz powierzchnia stanowi podłoże do rozwoju błony biologicznej. Podczas obrotu rotora w ściekach następuje jednoczesne opróżnianie i napełnianie złoża ściekami.

Schematycznie przedstawiono chwilowe ułożenie rotora w trakcie obrotów i oznaczono napowietrzanie medium płynnego, które jest intensyfikowane poprzez zróżnicowany zwrot i kierunek ruchu cieczy w zależności od danej warstwy peszli. Kąty nawinięcia kanałów karbowanych, ilość oraz sposób przeplotu wpływają na hydrodynamikę wymieszania powietrza ze ściekami (rys. 2).



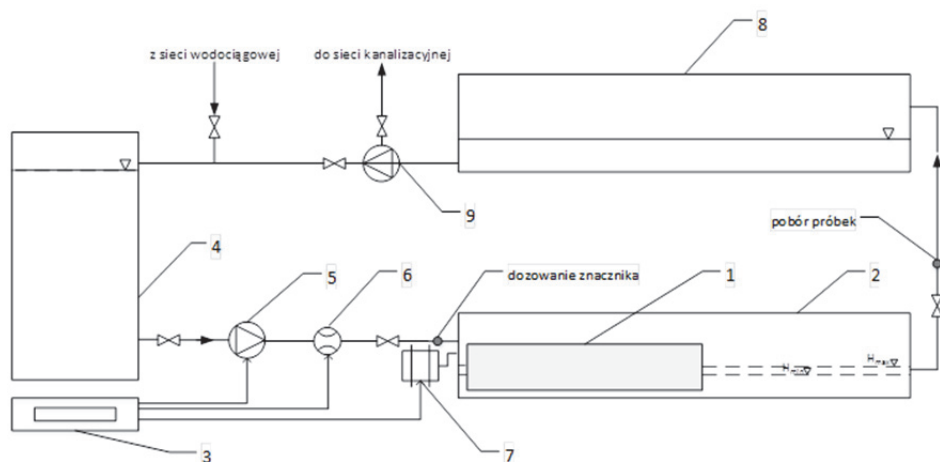
Rys. 2. Napowietrzanie ścieków w trakcie obrotu rotora: 1 – napowietrzanie cieczy w określonych warstwach peszli przez pobranie powietrza, 2 – odpływ medium z określonych warstw peszli

Fig. 2. Aeration of wastewater during the rotation of the rotor: 1 – fluid aeration in the given layers of corrugated pipes through the intake of air, 2 – draining of medium from the given layers of corrugated pipes

2.2. Stanowisko badawcze

Zaprojektowano i wykonano w skali laboratoryjnej instalację badawczą (rys. 2.3) z modelem złoża o zróżnicowanej konstrukcji odnośnie elementu głównego, tj. rotora. W skład instalacji (rys. 2.3) wchodzi złoże rotacyjne z elementem obrotowym typu rotor (1) połączone przewodem ze zbiornikiem zawierającym ciecz (4). Ciecz tłoczona jest ze zbiornika (4) pompką perystaltyczną o regulacji

natężenia przepływu w zakresie do $7 \text{ dm}^3/\text{min}$. Rotor obracany jest za pomocą układu napędowego poprzez motoreduktor (7) z możliwością płynnej regulacji obrotów w zakresie 0-10 obr/min. Ciecz ze złoża płynie przewodem do zbiornika pośredniego (8), może być przetłoczona pompą hydroforową (9) do zbiornika (4) i wówczas układ pracuje w obiegu cyrkulacyjnym lub doprowadzona do sieci kanalizacyjnej. Stanowisko wyposażono w przepływomierz elektromagnetyczny (6) kontrolujący natężenie przepływu cieczy dopływającej do złoża. Elementy układu, takie jak pompa (5), motoreduktor (7) oraz przepływomierz połączone są torami pomiarowymi z panelem sterującym (3).



Rys. 3. Schemat stanowiska laboratoryjnego: 1 – rotor, 2 – obudowa złoża, 3 – panel sterujący, 4 – zbiornik z medium badawczym, 5 – pompa perystaltyczna, 6 – przepływomierz elektromagnetyczny, 7 – układ napędowy, 8 – zbiornik pośredni, 9 – pompa hydroforowa

Fig. 3. Schematic diagram of the laboratory stand: 1 – rotor, 2 – RBC housing, 3 – control panel, 4 – tank with the test medium, 5 – peristaltic pump, 6 – electromagnetic flow meter, 7 – drive system, 8 – intermediate tank, 9 – hydrophore pump

Ciecz doprowadzana jest do zbiornika, stanowiącego obudowę złoża (2) do założonego poziomu wysokości rotora (1), co stanowi minimalny poziom zanurzenia gwarantując stały dopływ powietrza do peszli. W fazie rozruchowej stosuje się maksymalne obroty rotora w celu napełnienia złoża cieczą i przygotowania do ciągłej pracy. Proces ciągłej pracy zaczyna

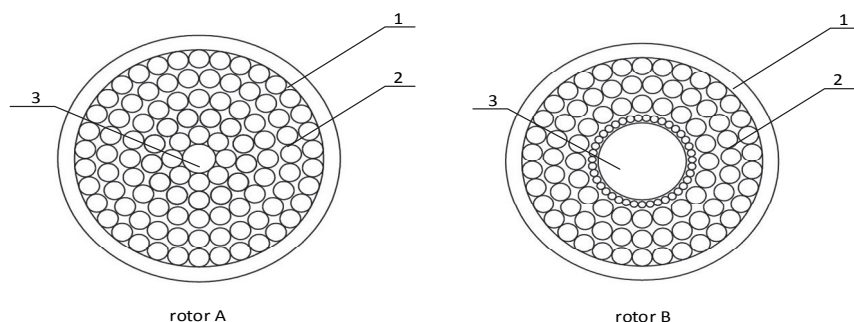
się gdy rotor unosząc się dzięki własnej wyporności będzie maksymalnie napełniony cieczą. Założono, że poziom ścieków nie może przekroczyć wysokości osi wału napędowego, a zarazem połowy średnicy złoża.

2.3. Metodologia badawcza

Metody znacznikowe są powszechnie stosowaną techniką wyznaczania charakterystyki hydrodynamicznej komór biologicznych (Battaglia i in. 1993, Mansouri i in. 2012). Badanie procesów zachodzących w przepływie cieczy polega na wprowadzeniu do przepływającego medium zachowującej się identycznie substancji tzw. traseru, lecz posiadającej określoną właściwość, wyróżniającą ją z oznakowanej partii materiału. Ta specyficzna cecha umożliwia detekcję znacznika, polegającą na rejestracji jego stężenia w funkcji czasu. Uzyskane w ten sposób przebiegi czasowe stanowią podstawę do analizy procesów zachodzących w badanym układzie. Ciecz badawczą stanowiła woda wodociągowa o temperaturze $t_0 \approx 15^\circ\text{C}$ i zasoleniu początkowym $S_0 \approx 0.352 \text{ g/dm}^3$. Jako traser zastosowano roztwór solanki (NaCl) o stężeniu $C_0 = 300 \text{ g/dm}^3$. Uwzględniając geometryczne i kinematyczne parametry pracy układu przyjęto do dalszych badań początkowe stężenie $C_0 = 100 \text{ g/dm}^3$. Uzyskano wyniki przedstawiające prawidłowe obrazy dynamiki cieczy w układzie, czyli wyraźne rozgraniczenie wartości stężenia na wylocie ze złoża w funkcji pracy rotora. Znacznik był wprowadzany określonymi porcjami na wlocie do złoża. Stężenie NaCl rejestrowano na wylocie ze złoża miernikiem wieloparametrowym Orion VERSA STAR, wyposażonym w sondę konduktometryczną.

Pomiary przeprowadzono przy stałych wartościach prędkości obrotowej rotora $v = 1 \text{ obr/min}$ i natężeniu cieczy dopływającej do złoża $V = 6,5 \text{ dm}^3/\text{min}$. By uzyskać możliwie długi czas retencji cieczy w złożu przeprowadzono pomiary dla różnych konstrukcji rotora (rys. 4).

Zastosowano dwa warianty konstrukcyjne rotora o zmiennych parametrach w zakresie średnicy pływaka (d_p) oraz liczby warstw peszli (l_w). Rotor A o średnicy pływaka $d_p = 30 \text{ mm}$ i liczbie warstw $l_w = 5$ oraz rotor B, dla którego odpowiednie wielkości wynosiły $d_p = 100 \text{ mm}$, $l_w = 3$. Na podstawie wyników pomiarów czasu retencji wykreślono krzywe rozkładu stężenia w przekroju odpływowym ze złoża będących próbą określenia dynamicznej charakterystyki pracy przy stosowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych rotora.



Rys. 4. Widok przekroju rotora przy zastosowaniu różnych konstrukcji pływaka i układu peszli w rotorze: 1 – obudowa rotora, 2 – układ peszli w rotorze, 3 – pływak

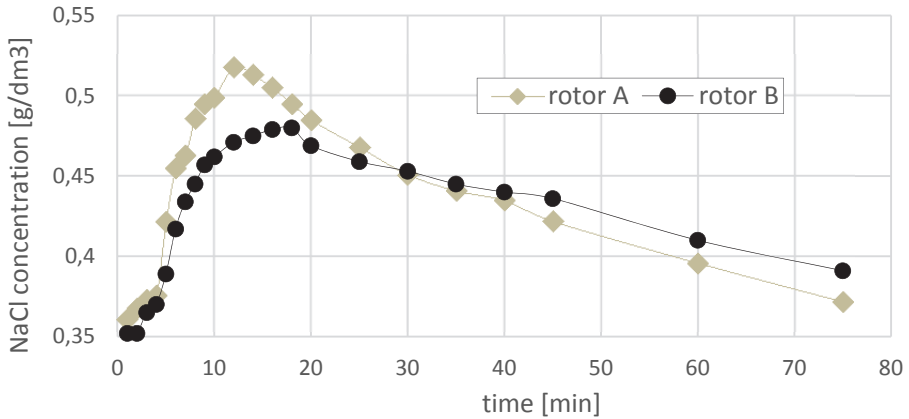
Fig. 4. Cross-section of the rotor with various float design variants and arrangements of corrugated pipes: 1 – rotor housing, 2 – arrangement of corrugated pipes in the rotor, 3 – float

3. Wyniki i analiza badań

We wszystkich analizowanych przypadkach zmiany stężenia znacznika na wypływie ze złoża mają określony charakter. W danym czasie dla poszczególnych wariantów występuje maksimum stężenia, a następnie maleje ono zbliżając się do wartości początkowej zasolenia S_0 cieczy. Podstawowym parametrem oceny badanego zjawiska jest wyznaczenie czasu retencji, w którym następuje maksymalne stężenie traseru.

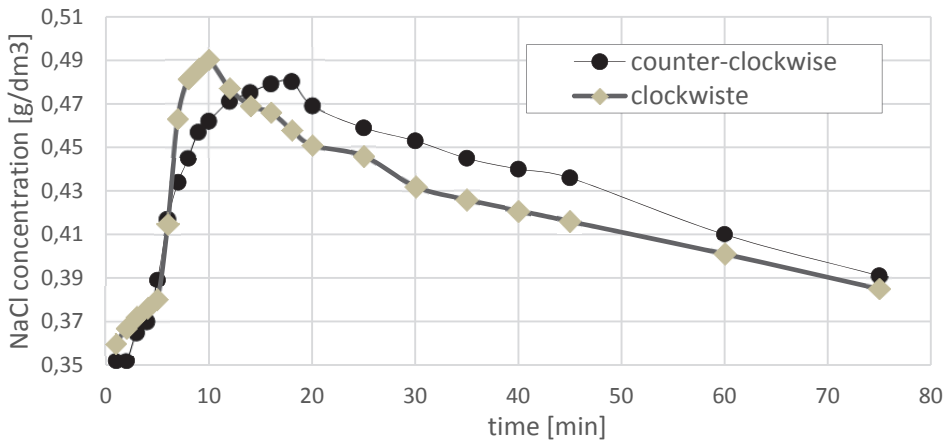
Porównanie wpływu zmiennych parametrów konstrukcyjnych (rotor A oraz rotor B) na długość czasu retencji obrazują wyniki badań (rys. 5). Dla rotora A średni czas zatrzymania cieczy wynosi $t = 12$ min, natomiast w przypadku rotora B, $t = 18$ min. Dodatkowo zaobserwowano poprawę stabilności pracy urządzenia przy zastosowaniu pływaka o większej średnicy. Do dalszych badań przyjęto rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w rotorze B.

Analizie poddano wpływ kierunku obrotów rotora na długość czasu zatrzymania cieczy w złożu i stwierdzono, że w przypadku obrotów lewoskrętnych czas retencji jest niemal dwukrotnie dłuższy (rys. 6). Uzyskany efekt związany jest ze zróżnicowanym zwrotem i kierunkiem ruchu cieczy w poszczególnych warstwach peszli, co daje różną recyrkulację cieczy w zależności od kierunków obrotu rotora.



Rys. 5. Rozkład czasu przebywania (RTD) dla dwóch wariantów konstrukcyjnych rotora (rotor A, rotor B). Prędkość obrotowa rotora 1 obr/min, obroty lewoskrętne, natężenie przepływu wody $6,5 \text{ dm}^3/\text{min}$, stężenie znacznika $100 \text{ g NaCl}/\text{dm}^3$.

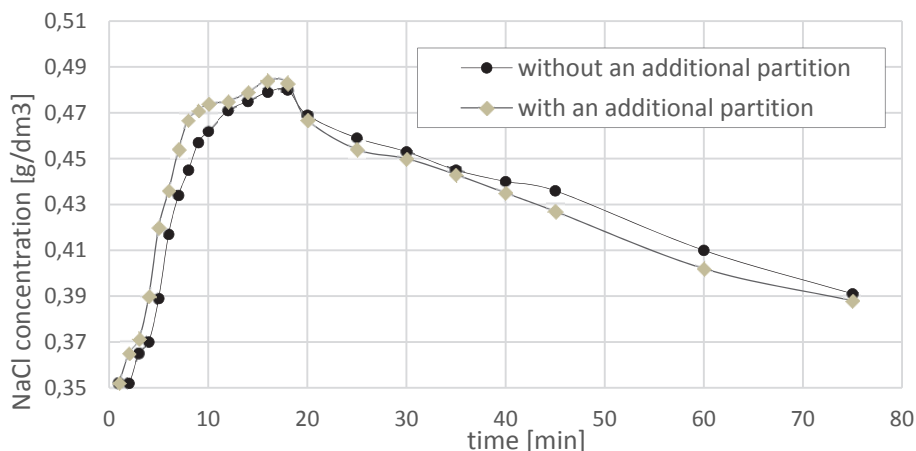
Fig. 5. Residence time distribution for two design variants of the rotor (rotor A, rotor B). Rotational speed: 1 rpm, counter-clockwise rotation, water flow rate: $6.5 \text{ dm}^3/\text{min}$, tracer concentration: $100 \text{ g NaCl}/\text{dm}^3$



Rys. 6. Rozkład czasu przebywania (RTD) dla rotora B w przypadku obrotów lewo- i prawoskrętnych. Prędkość obrotowa rotora 1 obr/min, natężenie przepływu wody $6,5 \text{ dm}^3/\text{min}$, stężenie znacznika $100 \text{ g NaCl}/\text{dm}^3$

Fig. 6. Residence time distribution for rotor B with counter-clockwise and clockwise rotation. Rotational speed: 1 rpm, water flow rate: $6.5 \text{ dm}^3/\text{min}$, tracer concentration: $100 \text{ g NaCl}/\text{dm}^3$

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład czasu zatrzymania cieczy w złożu dla dwóch rozwiązań konstrukcyjnych rotora B dla oceny istotności stosowania dodatkowej przegrody na wylocie rotora celem zwiększenia recyrkulacji cieczy przez rotor. Stwierdzono, że zastosowanie przegrody nie wpływa na zwiększenie czasu retencji. W obydwu przypadkach czas zatrzymania cieczy wahał się w granicach 18 min.



Rys. 7. Rozkład czasu przebywania (RTD) dla dwóch rozwiązań konstrukcyjnych rotora B – z dodatkową przegrodą oraz bez dodatkowej przegrody. Prędkość obrotowa rotora 1 obr/min, obroty lewoskrętne, natężenie przepływu wody 6,5 dm³/min, stężenie znacznika 100g NaCl/dm³.

Fig. 7. Residence time distribution for two rotor B variants – with and without an additional partition. Rotational speed: 1 rpm, counter-clockwise rotation, water flow rate: 6.5 dm³/min, tracer concentration: 100g NaCl/dm³.

4. Wnioski

Otrzymane wyniki wskazują na możliwość wpływania poprzez rozwiązania konstrukcyjne i kinematykę pracy rotora na czas kontaktu przepływającej cieczy ze złożem (retencję), który jest jednym z parametrów decydujących o wydajności i jakości pracy obrotowych złoż biologicznych.

Dla analizowanych rozwiązań w zakresie geometrii układu rotora i kierunku jego obrotów czas retencji wahał się w granicach 10-18 min. Najdłuższy czas zatrzymania $t = 18$ min uzyskano w przypadku rotora w wariacie konfiguracyjnym z pływakiem o średnicy $d_p = 100$ mm

i trzema warstwami peszli oraz zastosowaniu obrotów lewoskrętnych. Dodatkowo zaobserwowano, że zastosowanie wymienionego rozwiązania konstrukcyjnego skutkuje poprawą stabilności pracy złoża w zakresie zapewnienia płynnych obrotów rotora.

Przeprowadzona analiza rozwiązań konstrukcyjnych pozwoliła na wybór konfiguracji układu złoża celem zastosowania w kanalizacyjnej sieci demonstracyjnej i stanowi podstawę prowadzenia dalszym badań w tym zakresie.

Podziękowania

Autorzy dziękują za wsparcie finansowe z projektu badawczego: Innowacyjny system kanalizacji sanitarnej DEMONSTRATOR +, NCBR w ramach umowy nr No UOD-DEM-1-591/001

Literatura

- Battaglia, A., Fox, P., Pohland, F.G. (1993). Calculation of residence time distribution from tracer recycle experiments. *Water Research*, 27(2), 337-341.
- Błażejowski, R., Skubisz, W. (2005). Grawitacyjna kanalizacja małosrednicowa. *Gaz, Woda i Technika sanitarna*, 10, 21-25.
- Borghini, M., Pallazi, E., Parisi, F., Ferraiolo G. (1985). Influence of process variables on the modelling and design of a rotating biological surface. *Water Research*, 19(5), 573-580.
- Celenza, G. (1999). *Industrial Waste Treatment Process Engineering: Biological Processes*. Vol. II. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Duda, A., Korga, S., Skubisz, W. (2014). Wykorzystanie wspomaganie komputerowego w projektowaniu i budowie instalacji pilotażowych na przykładzie innowacyjnych rozwiązań urządzeń kanalizacji małosrednicowej zrównoważonego przepływu. In Pacyna Jerzy (ed.), *Prace Szkoły Inżynierii Materiałowej: 42 Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Rytro, 23-26.09.2014, Kraków: AKAPIT*, 304-307.
- Ghawi, A.H., Kris, J. (2009). Use of rotating biological contactor for appropriate technology wastewater treatment. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 3, 1-8.
- Hanhan, O1, Orhon, D, Krauth, Kh, Gündler, B. (2005). Evaluation of denitrification potential of rotating biological contactors for treatment of municipal wastewater. *Water Science and Technology*, 51(11), 131-9.
- Horan, N.J., Parr, J., Naylor, P.J. (1991). Evaluation of tracers for the determination of the mixing characteristics of activated sludge reactors. *Environmental Technology*, 12(7), 603-608.

- Lenik, K., Korga, S., Kozera, R., Szalapko, J. (2013). FEM and Flow Simulation Module for selecting parameters in rotors flow systems. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2(59), 69-75.
- Lenik, K., Skubisz, W., *Urządzenie i sposób biologicznego oczyszczania ścieków*. Zgłoszenie patentowe P.411985. In press.
- Mansouri, Y., Zinatizadch, A.A., Mohammadi, P., Irandoust, M., Akhbari, A., Davoodi, R. (2012). Hydraulic characteristics of an anaerobic rotatory biological conactor (AnRBC) using tracer experiments and response surface methodology (RSM). *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29(7), 891-902.
- Mba, D., Bannister, R. (2007). Ensuring effluent standards by improving the design of Rotating Biological Contactors. *Desalination*, 208, 204-2015.
- Pathan, A.A., Rasool, B.M., Memon, F.A. (2015). Effect of flow rate and disc area increment on the efficiency of rotating biological contactor for treating greywater. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 2(34), 99-106.
- Patwardhan, A.W. (2003). Rotating biological contactors: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 2035-2051.
- Pradeep, N.V., Hampannavar, U.S. (2011). Biodegradation of phenol using rotating biological contactor. *International Journal of Environmental Sciences*, 2(1), 105-113.
- Szulżyk-Cieplak, J., Lenik, K., Ozonek, J. (2015). Ocena wiejskich systemów kanalizacyjnych na przykładzie województwa lubelskiego. In Chmielewski Jarosław, Szpringer Monika (ed.), *Zdrowie, praca, środowisko – społeczne dylematy*, 241-252. Warszawa: Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy.
- Waskar, V.G., Kulkarni, G.S., Kore, V.S. (2012). Review on process, application and performance of rotating biological contactor (RBC). *International Journal of Science and Research Publications*, 2(7), 1-6.

The Selection of Design Parameters of the Rotating Biological Contactor Using Tracer Studies

Abstract

The subject of research consists in a rotational biological contactor with a rotor characterized by a bi-directional longitudinal flow as an element of synchronized system of disposal and biological treatment of sanitary wastewater in small-bore sewerage. The rotor design is based on a system of corrugated protective pipes, arranged in coils wound around its rotation axis. The corrugated pipes have two purposes. On the one hand, they ensure and enable the aeration

of activated sludge, and provide the surface for biofilm development on the other. The special winding of corrugated pipes enables a bi-directional flow of the liquid medium. During the rotation of the rotor, the RBC is simultaneously emptied and filled with wastewater. The structure of the rotational biological contactor aims to provide intensive aeration of the transported wastewater, which would allow for a greater development of microorganisms participating in the hybrid treatment of wastewater, i.e. the activated sludge method and by means of a trickling filter. Design solutions of the rotor pertaining to coil arrangement and the drive system were analyzed and tracer studies of hydrodynamics were performed in regard to the selection of appropriate structural parameters of the device. The obtained results indicate a clear influence of the design solution and its kinematics on the aeration time of the flowing medium, which is one of the parameters governing the efficiency and quality of RBC operation.

Słowa kluczowe:

biologiczne złożo obrotowe, ścieki bytowe, biologiczne oczyszczanie ścieków

Keywords:

rotating biological contactor (RBC), domestic sewage, biological wastewater treatment