

Adam MASŁOŃ
Janusz A. TOMASZEK
Politechnika Rzeszowska

PRZEGLĄD LITERATURY NOWYCH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH REAKTORÓW SEKWENCYJNYCH Z BŁONĄ BIOLOGICZNĄ

W pracy dokonano przeglądu nowoczesnych rozwiązań sekwencyjnych reaktorów porcjowych z błoną biologiczną (*Sequencing Batch Biofilm Reactor*), pod względem ich wykorzystania do zintegrowanego usuwania węgla, azotu i fosforu ze ścieków. Przedstawiono reaktory z błoną biologiczną w postaci złoża ruchomego, stałego i zanurzanego. Przegląd piśmiennictwa wykazał, że sprawność systemów SBBR kształtuje się na różnym poziomie, w zależności od zastosowanego wypełnienia, i uwarunkowana jest odpowiednią strategią pracy reaktora porcjowego. Analiza literatury przedmiotu wskazała na znaczny potencjał systemów SBBR w usuwaniu związków biogennych. Spośród zaprezentowanych systemów zdecydowanie najwyższą efektywność zintegrowanego usuwania C, N i P zapewniają reaktory porcjowe ze złożem zawieszonym MBSBBR.

1. Wprowadzenie

Zwiększone wymagania dotyczące jakości ścieków oczyszczonych powodują, że wzrasta obecnie zainteresowanie procesami zintegrowanego usuwania węgla organicznego, azotu i fosforu. Towarzyszą temu wielokierunkowe badania naukowe i eksploatacyjne nad poprawą efektywności oraz optymalizacją warunków przebiegu procesów jednostkowych w różnych systemach i układach technologicznych. Nieustanne poszerzanie wiedzy na ten temat powoduje, że stosowane metody wciąż ewoluują.

W ostatnim czasie analizowano wiele nowatorskich technologii bazujących na połączeniu tradycyjnej technologii osadu czynnego z wypełnieniem tworzącym dodatkową powierzchnię z rozwiniętą błoną biologiczną. Układy takie pozwalają na wprowadzenie nowej strategii oczyszczania ścieków, zapewniając lepszą efektywność procesów jednostkowych, przez co stają się konkurencyjnym rozwiązaniem dla systemów klasycznych. Nowym kierunkiem badań są systemy porcjowe SBR oraz ich modyfikacje. Ponieważ w niektórych przypadkach sekwencyjne reaktory porcjowe wykazują przewagę nad układami prze-

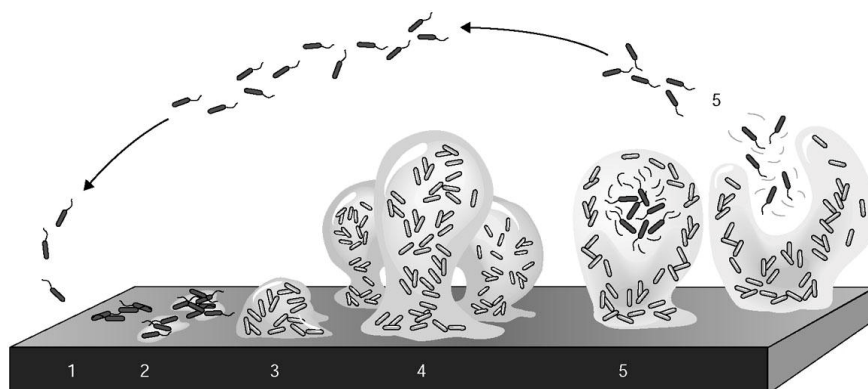
plywowymi (np. elastyczność w odniesieniu do przepływu i obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń) [51, 52, 58], a procesy z biofilmem nad procesami osadu czynnego [20, 21, 38], to istnieje możliwość zintensyfikowania procesów usuwania substancji biogennych ze ścieków w reaktorach porcjowych poprzez zastosowanie dodatkowej biomasy w postaci błony biologicznej.

W artykule przedstawiono nowe rozwiązania technologiczne sekwencyjnych reaktorów porcjowych z biomasą immobilizowaną na nośniku. Prezentowanym rozwiązaniom przypisano uzyskiwaną z ich wykorzystaniem efektywność usuwania ze ścieków związków węgla organicznego, azotu i fosforu.

2. Oczyszczanie ścieków w systemach z błoną biologiczną

Biologiczne oczyszczanie ścieków może być realizowane w systemach z biomasą znajdującą się w stanie zawieszenia (osad czynny) lub przytwierdzoną do podłoża nośnego (błona biologiczna).

Błona biologiczna, nazywana często biofilmem (z ang. *film* – warstwa), stanowi zwartą śluzową masę, dobrze związaną ze stałym wypełnieniem, w której mikroorganizmy chronione są przed oderwaniem i zniszczeniem. Tworzy się ona na granicy dwóch faz – podłoża stałego i ścieków, dzięki naturalnej immobilizacji biomasy w odpowiednich warunkach środowiskowych [19, 57]. Generowanie i rozwój biofilmu przebiega kilkufazowo w sposób przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Etapy powstawania biofilmu: 1 – adhezja mikroorganizmów do powierzchni nośnika, 2 – rozwój struktury biofilmu, 3 – dojrzewanie struktury biofilmu, 4 – rozmnażanie się mikroorganizmów, 5 – dyspersja mikroorganizmów poza biofilm

Źródło: opracowanie własne na podstawie pracy [48].

Zdolność mikroorganizmów do naturalnej immobilizacji na nośniku najwcześniej wykorzystano w technologii ścieków w tradycyjnych złożach biologicznych. Poza klasycznymi złożami stałymi (zraszane, splukiwane, zanurzane)

w stosowanych systemach z błoną biologiczną można wyodrębnić: złoża obrotowe (tarczowe, dyskowe), filtry biologiczne (biofiltry) oraz reaktory ze złożem zawieszonym i fluidalnym [4, 19]. Oprócz oczekiwanych efektów stosowania nośników mikroorganizmów w bioreaktorach (zatrzymanie biomasy i zwiększenie jej koncentracji), badania wykazały zupełnie nieoczekiwane skutki immobilizacji drobnoustrojów. Okazało się m.in., że występuje zasadnicza odmienność składu fizjologicznych cech pomiędzy komórkami rozproszonymi i przytwierdzonymi przez adsorpcję do nośnika. Doświadczenia w tym zakresie dowiodły, że utwierdzone do podłoża mikroorganizmy mogą wykazywać wielokrotnie większą aktywność metaboliczną niż komórki swobodnie zawieszone w oczyszczonym medium [19, 31]. Rozwój technologii oczyszczania ścieków wykorzystujących mikroorganizmy w postaci biofilmu nastąpił z chwilą opanowania metod pozwalających na poznanie ich struktury (morfologia, skład gatunkowy itp.) [31].

Oprócz tzw. „czystej” technologii (np. biofiltracji, złoża stałego) możliwe jest również stosowanie metod hybrydowych, stanowiących połączenie błony biologicznej i osadu czynnego, czyli biomasy zawieszanej i utwierdzonej do nośników w jednym reaktorze. Układy takie, w porównaniu z klasycznym osadem czynnym, charakteryzują się większą odpornością na zmiany ilości i składu ścieków oraz pozbawione są niektórych wad złóż biologicznych, co skutkuje poprawą efektywności poszczególnych procesów oczyszczania ścieków.

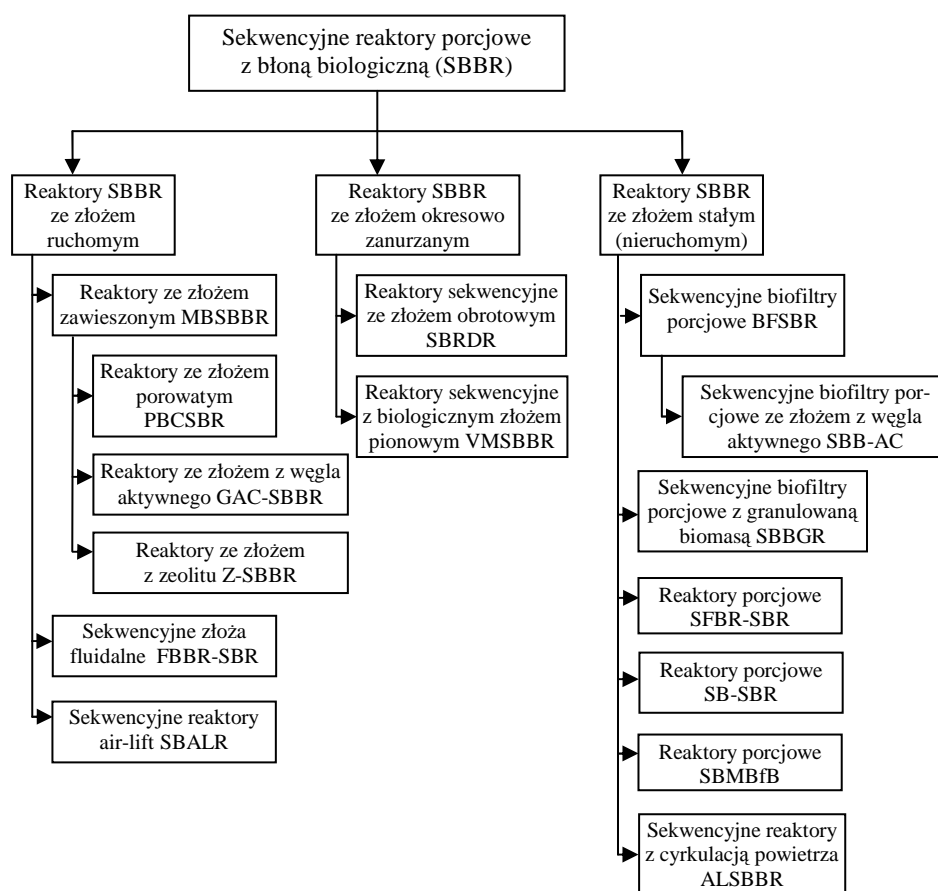
3. Rozwiązania technologiczne sekwencyjnych reaktorów porcjowych z błoną biologiczną

3.1. Klasyfikacja sekwencyjnych reaktorów porcjowych z błoną biologiczną

Klasyczne rozwiązanie sekwencyjnych reaktorów porcjowych stało się w ostatnim czasie przedmiotem wielu modyfikacji mających na celu zwiększenie efektywności usuwania zanieczyszczeń ze ścieków. Podobnie jak w przypadku układów przepływowych, również w systemach SBR możliwe jest zastosowanie dodatkowej biomasy w postaci błony biologicznej. Powierzchnię dla wzrostu mikroorganizmów w sekwencyjnych reaktorach porcjowych z błoną biologiczną SBBR (*Sequencing Batch Biofilm Reactor*) stanowią różne materiały i w zależności od rodzaju oraz formy podłoża wprowadzonego do reaktora można wyróżnić reaktory ze złożem stałym, ruchomym lub okresowo zanurzonym (rys. 2.).

Mechanizm przemian związków biogennych w systemach SBBR polega na wykorzystaniu procesów nitryfikacji i denitryfikacji, w tym także symultanicznej nitryfikacji/denitryfikacji przy udziale denitryfikacyjnych mikroorganizmów defosfatacyjnych oraz biologicznej defosfatacji [3, 17, 18, 23, 27]. Możliwa jest również eliminacja azotu poprzez częściową nitryfikację do azotynów (nitryta-

cję) połączoną z beztlenowym utlenianiem amoniaku z udziałem mikroorganizmów *Planctomycetales* (*Brocardia anammoxidans* i *Kuenenia stuttgartiensis*; proces *Anammox*) [1, 20, 37, 38]. Usuwanie fosforu ze ścieków w sekwencyjnych reaktorach z błoną biologiczną odbywa się w procesie biologicznej defosfatacji, prowadzonym przez bakterie rozwinięte w postaci biofilmu („czysta” technologia) lub równocześnie w postaci błony biologicznej i osadu czynnego (technologia hybrydowa). W przypadku połączenia biomasy osiadłej i zawieszanej w systemach SBBR istnieje możliwość wytworzenia się dwóch specyficznych, zróżnicowanych populacji mikroorganizmów, odpowiedzialnych za usuwanie związków azotu i fosforu. Na przykład w biomacie immobilizowanej na nośnikach mogą występować nityfikacyjne organizmy (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*), a w zawieszonych kłaczkach – mikroorganizmy denitryfikacyjne [50].



Rys. 2. Klasyfikacja sekwencyjnych reaktorów porcjowych z błoną biologiczną

3.2. Sekwencyjne reaktory ze złożem ruchomym

Technologia złoża ruchomego polega na wykorzystaniu jako nośników biomasy poruszających się w ściekach ruchomych elementów. W zależności od sposobu ruchu i zawieszenia unoszących się nośników z błoną biologiczną złożo ruchome może znajdować się w stanie zawieszonym lub fluidyzacji, wywołanym przepływem ścieków lub powietrza.

W technologii MBSBBR (*Moving Bed Sequencing Batch Biofilm Reactor*) gęstość stosowanych nośników błony biologicznej, która zbliżona jest do gęstości wody, powoduje, że złożo znajduje się w zawieszeniu w całej objętości reaktora. Metoda ta może być prowadzona w dwóch wariantach: jako „czysta” technologia lub w układzie hybrydowym [60]. Stosowane w reaktorach MBSBBR elementy wypełnienia złoża wykonane z różnych materiałów (tworzywa sztuczne, pianki poliuretanowe itp.) charakteryzują się różnym kształtem, przez co posiadają zróżnicowaną powierzchnię właściwą ($800-1000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ wypełnienia), warunkującą rozwój mikroorganizmów. Z tego względu kształt nośników i rodzaj wypełnienia determinuje prowadzenie biologicznego oczyszczania ścieków [35, 36, 60].

Przegląd literatury wskazuje na możliwość zastosowania w reaktorach MBSBBR jako nośnika biomasy, oprócz klasycznych kształtek tworzywowych, materiałów o wysokiej porowatości (reaktory PBCSBR – *Porous Biomass Carrier Sequencing Batch Reactor*) [11, 30, 45, 47, 54] oraz substancji, które dodatkowo są sorbentami, np. granulowany węgiel aktywny (GAC-SBBR – *Granular Activated Carbon-Sequencing Batch Biofilm Reactor*) i zeolit (Z-SBBR – *Zeolite-Sequencing Batch Biofilm Reactor*) [10, 22, 29]. W reaktorach sekwencyjnych ze złożem zawieszonym wytwarzana jest na nośnikach specyficzna błona biologiczna. Zmienne warunki pracy reaktora porcjowego ze złożem ruchomym powodują wykształcenie się aktywnego biochemicznie biofilmu oraz umożliwiają jego całkowitą penetrację przez substraty i akceptory elektronów [32].

Materiały porowate jako nośniki biomasy zapewniają dużą powierzchnię podłoża mikrobiologicznego oraz poprawiają dyfuzję substratów do wnętrza biofilmu, zwiększając tym samym jego efektywność [11]. Z kolei węgiel aktywowany stanowi „aktywne” złożo biochemiczne, wspomagające oczyszczanie ścieków zawierających nierozkładalne lub trudno rozkładalne biologicznie zanieczyszczenia. Zastosowanie węgla aktywnego pozwala osiągnąć dobrą degradację związków organicznych w odniesieniu do dużego obciążenia ładunkiem i niskiego ok. 0,3 ilorazu BZT₅/ChZT (słabo biodegradowalne ścieki) [10].

Eliminacja azotu może przebiegać na drodze symultanicznej nitryfikacji/denitryfikacji (SND), przy udziale denitryfikacyjnych mikroorganizmów defosfatacyjnych [3, 17, 18, 40], jak również w wyniku procesu *Anammox* [20, 38]. Parametrem determinującym SND jest stężenie tlenu, które powinno pozostawać w zakresie $1,0-1,5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ [61]. Podedworna i Żubrowska-Sudoł [39] wykazały, że w przypadku układu hybrydowego możliwe jest również pro-

wadzenie nityfikacji nawet w warunkach obniżonego wieku osadu. Sprawność usuwania fosforu w reaktorach MBSBBR uwarunkowana jest obciążeniem biomasy ładunkiem związków organicznych łatwo przyswajalnych w fazie anaerobowej [20, 21, 38, 40], stężeniem tlenu rozpuszczonego w fazach aerobowych [60], periodycznością usuwania osadu nadmiernego [32] oraz wykształceniem i wpracowaniem błony biologicznej na powierzchni złoża ruchomego [45]. Wysoki iloraz ChZT:P w ściekach surowych ($>28,0$) wpływa na wzrost eliminacji fosforu, gwarantując usunięcie tego pierwiastka do poziomu mniejszego niż $1,0 \text{ mg P} \cdot \text{dm}^{-3}$ [45].

Prowadzone badania w skali laboratoryjnej wykazały, że reaktory porcjowe ze złożem zawieszonym pozwalają na sprawne usuwanie związków węgla, azotu i fosforu, a efektywność oczyszczania zależy od przyjętego cyklu pracy reaktora i składu ścieków (obciążenia substratowego reaktora MBSBBR) (tab. 1.). Stabilne usuwanie azotu i fosforu ogólnego gwarantują wartości ChZT:N:P w ściekach surowych wyższe od 30:6:1 [60]. Ponadto na wysokosprawne zintegrowane usuwanie azotu i fosforu ogólnego istotny wpływ ma stosunek długości fazy anaerobowej do całkowitej długości cyklu [20].

Technologię MBSBBR charakteryzuje duża elastyczność oraz łatwość eksploatacji. Pastorelli i inni [38] wykazali, że zastosowanie „czystej” technologii *moving bed* pozwala wyeliminować fazę sedymentacji, ponieważ większość biomasy występuje w postaci błony biologicznej utwardzonej na nośnikach. Wobec tego możliwe jest również skrócenie długości cyklu reaktora. Mimo wielu zalet technologia MBSBBR nie została jeszcze zastosowana w skali technicznej.

W technologii SBBR próbowano również zastosować złożo ruchome w postaci złoża fluidalnego. Rovatti i inni [44] testowali układ FBBR-SBR (*Fluidized Bed Biological Reactor as Sequencing Batch Reactor*) do usuwania fosforu ze ścieków. Uzyskano małe sprawności usuwania fosforu ogólnego (30,0-70,6%) oraz związków organicznych (68,6-97,05%), wobec czego dalsze badania tej metody zostały zaniechane.

Podobne rozwiązanie zastosowali Brenner i inni [5], łącząc technologię air-lift i SBR. W systemie SBALR (*Sequencing Batch Air-lift Reactor*) złożo z błoną biologiczną znajduje się w stanie zawieszonym wywołanym dopływem powietrza. Analiza pracy systemu z beztlenową fazą statycznego napełniania przez warstwę osadu i tlenową fazą reakcji wykazała dobrą sprawność w usuwaniu związków organicznych na poziomie od 96 do 98,1%, odpowiednio dla 12- i 8-godzinnej cyklu pracy. Ponadto autorzy potwierdzili przydatność technologii do oczyszczania ścieków przemysłowych za pomocą modelu matematycznego.

3.3. Sekwencyjne reaktory ze złożem stałym

W reaktorach SBBR ze złożem nieruchomym stałym wykorzystywane są specjalne wkłady, pakiety bądź wypełnienia stacjonarne, charakteryzujące się dużą powierzchnią właściwą dla rozwoju biomasy. Rozwiązanie sekwencyjnych biofiltrów porcjowych BFSBR (*Biofilm Filter Sequencing Batch Reactor*) polega na zastosowaniu złoża stałego, na którym występuje kombinacja procesów filtracji i rozkładu biochemicznego. Wypełnienie mogą stanowić warstwy: tworzywowych kształtek [15, 27], gliny prażonej [2, 6], węgla aktywnego (reaktory SBB-AC – *Sequencing Batch Biofilter Activated Carbon*) [8] oraz łamanego tłucznia skalnego [7, 55]. W zależności od charakteru nośnika biomasy systemy BFSBR mogą posiadać charakter złoża filtracyjnego [2, 15, 23] lub mogą łączyć cechy złoża fluidalnego, stałego oraz biofiltru [6]. Nadmiar biomasy najczęściej jest usuwany poprzez płukanie złoża wodą lub ściekami oraz powietrzem [15].

Badania sekwencyjnych biofiltrów wykazały możliwość usuwania azotu w wyniku symultanicznej nityfikacji i denityfikacji (SND) [15, 27]. W porównaniu z konwencjonalnymi systemami biologicznymi (0,3-0,5 kg s.m./kg ChZT) analizowany system charakteryzuje się niższym przyrostem biomasy 0,03 kg s.m./kg usuniętego ChZT. Doniesienia literaturowe wskazują także na zastosowanie dodatkowej biomasy w postaci granulowanego osadu tlenowego (granulowana/ziarnista forma biomasy) w biofiltrach sekwencyjnych SBBGR (*Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor*) [12-14]. Wprowadzenie ziarnistego osadu umożliwia zwiększenie stężenia biomasy, nawet do 38 g s.m. · dm⁻³ [14]. Biofiltry sekwencyjne mogą być stosowane do oczyszczania ścieków komunalnych i przemysłowych, a także ścieków zawierających słabo rozkładalne związki organiczne (tab. 2.) [7, 8, 55].

Nośnikiem biomasy immobilizowanej w reaktorach sekwencyjnych ze złożem nieruchomym są elementy włókniste (włókna z tworzyw sztucznych i ich sploty, włókna poliestrowe, włókniste membrany itp.) [26, 50, 53, 56, 59], których powierzchnia właściwa mieści się w granicach od 155 [9] do ponad 1200 m²/m³ [59], lub pakiety porowatych materiałów (pianka polietylenowa) [25]. Badania prowadzone w różnego typu reaktorach: SB-SBR (*Submerged Biofilm Sequencing Batch Reactor*) [26, 56], SFBR-SBR (*Submerged Fixed Bed Reactor-SBR*) [9], SBMBfR (*Sequencing Batch Membrane Biofilm Reactor*) [50], ALSBBR (*Air-lift Loop Sequencing Batch Biofilm Reactor*) [59] pozwoliły określić ich przydatność do usuwania związków biogenych ze ścieków w procesach nityfikacji i denityfikacji (również SND) oraz defosfatacji biologicznej. Zróżnicowana strategia pracy reaktorów porcjowych umożliwia dużą oraz stabilną eliminację C, N i P (tab. 2.). Wypełnienie materiałem włóknistym reaktora SBBR może stanowić nawet do 30% objętości reaktora, przez co można osiągnąć wysokie stężenie biomasy na poziomie 8,8 g s.m. · dm⁻³ [26] i ok. 7,7 g s.m. · m⁻² nośnika [53]. Zastosowanie włóknistych nośników biomasy pozwala w reaktorze uzyskać zróżnicowaną strukturę mikroorganizmów (błona

biologiczna i kłaczkowy osadu zawieszonego). Na specyficznych nośnikach włóknistych może zostać wytworzony nitryfikacyjny biofilm, natomiast w zawieszeniu mogą być obecne denitryfikacyjne mikroorganizmy akumulujące polifosforany (DNPAOs) [50]. Rozpatrywane systemy mogą być z powodzeniem wykorzystane do oczyszczania ścieków komunalnych i przemysłowych oraz odcieków składowiskowych (tab. 2.) [25, 49].

3.4. Sekwencyjne reaktory ze złożem okresowo zanurzonym

Wśród sekwencyjnych reaktorów z błoną biologiczną można wyróżnić grupę reaktorów ze złożem okresowo zanurzonym. Koncepcja sekwencyjnego porcjowego złoża dyskowego SBRDR (*Sequencing Batch Rotating Disc Reactor*) polega na zastosowaniu biologicznego złoża obrotowego w reaktorze sekwencyjnym [1, 28]. Rozwiązania te mogą być stosowane do oczyszczania ścieków komunalnych i przemysłowych (tab. 3.).

Jedną z pierwszych próba zastosowania tego rozwiązania wykazała bardzo małą efektywność, gdzie szybkość usuwania azotu była mniejsza niż klasycznego dyskowego złoża biologicznego (odpowiednio): $73 \text{ g NH}_4\text{-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ i $275 \text{ g NH}_4\text{-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ [28]. Antileo i inni [1] uzyskali natomiast relatywnie wyższą efektywność procesową nitryfikacji na poziomie 1,45-4,25 $\text{kg NH}_4\text{-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. W błonie biologicznej obecne były nitryfikatory: 95% *Nitrosomonas* i 5% *Nitrobacter*, co świadczy o prowadzeniu procesu nitryfikacji. Z kolei Rodziejewicz i inni [42, 43] zastosowali w sekwencyjnym reaktorze złoża tarczowe wspomagane przepływem prądu elektrycznego, w wyniku czego otrzymano wzrost denitryfikacji o 20% przy przepływie prądu $40 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$.

Rodgers i inni [41] opracowali sekwencyjny układ z pionowym złożem biologicznym VMSBBR (*Vertically Moving Sequencing Batch Biofilm Reactor*). W komorze reaktora porcjowego zastosowano ruchome moduły (bloki) z błoną biologiczną, które okresowo, naprzemiennie zanurzały się w całej objętości reaktora. Autorzy zaobserwowali, że pionowy ruch biofilmowych bloków dostarcza dodatkowo tlen do fazy tlenowej i zapobiega zatykaniu się biofilmu. Opracowana technologia VMSBBR charakteryzuje się bardzo dobrą efektywnością w zakresie usuwania związków organicznych i fosforu mineralnego (94,8 i 90%) oraz niewielkim zużyciem energii (0,6 kWh/kg ChZT usuniętego).

4. Podsumowanie

Przedstawione w pracy rozwiązania sekwencyjnych reaktorów z błoną biologiczną SBBR pozwalają w znaczny sposób zintensyfikować procesy usuwania związków węgla organicznego, azotu i fosforu ze ścieków komunalnych oraz przemysłowych, jak też ścieków specyficznych, np. wód osadowych z fermentacji metanowej osadów ściekowych i odcieków ze składowiska odpadów. Stosowane systemy SBBR mogą pracować zarówno w „czystej”, jak i hybrydowej technologii.

Kluczowym czynnikiem do prawidłowego i stabilnego rozwoju mikroorganizmów biofilmu w reaktorach SBBR jest podłoże, które powinno zapewnić odpowiednią powierzchnię kontaktu mikroorganizmów z usuwanymi ze ścieków substancjami. Wydajność procesowa nityfikacji/denitryfikacji i usuwania fosforu kształtuje się na różnym poziomie, w zależności od zastosowanego wypełnienia. Dodatkowo sprawność analizowanych systemów z błoną biologiczną uwarunkowana jest odpowiednią strategią pracy reaktora porcjowego (właściwie ustalony cykl, fazy itp.), przy zachowaniu właściwych warunków aerobowych i anoksyczno-anaerobowych. Analiza piśmiennictwa wskazuje na znaczny potencjał systemów SBBR pod względem usuwania związków biogenych (tab. 1.-3.). Spośród analizowanych systemów zdecydowanie największą efektywność zintegrowanego usuwania C, N i P wykazują reaktory porcjowe ze złożem zawieszonym MBSBBR.

Zaletą systemów SBBR jest możliwość przyjęcia znacznie większych ładunków zanieczyszczeń, w porównaniu z analogiczną objętością klasycznego reaktora SBR. Uzyskanie wysokiego stężenia biomasy poprzez jej zatrzymanie na nośnikach zwiększa stabilność biologicznego oczyszczania ścieków i elastyczność w odniesieniu do zmiennych ładunków zanieczyszczeń dopływających do układu. Poza tym systemy SBBR wykazują bardzo dobrą tolerancję na wahania pH i temperatury oraz zawartość substancji toksycznych. Zastosowanie dodatkowej biomasy w formie błony biologicznej ma istotne znaczenie w modernizacji istniejących układów SBR, często przeciążonych hydraulicznie, lub o niskiej efektywności biologicznego oczyszczania ścieków. Poprawa sprawności oczyszczania sprowadza się do wprowadzenia do reaktora porcjowego odpowiedniego podłoża dla rozwoju mikroorganizmów w postaci pakietów i wkładów stacjonarnych (złoże stałe) lub elementów mobilnych (złoże ruchome). Systemy SBBR są również rozwiązaniem alternatywnym w przypadku nowo powstających oczyszczalni, ponieważ możliwe jest wówczas zastosowanie mniejszej objętości reaktora porcjowego. Kolejną zaletą systemów SBBR jest uniezależnienie wieku biomasy rozwijającej się w postaci błony biologicznej od hydraulicznego czasu zatrzymania ścieków w układzie.

Wadą systemów SBBR może być niekontrolowane zarastanie lub ścinanie biomasy immobilizowanej w przypadku zbyt małych lub dużych sił tnących, warunkujących grubość biofilmu na nośnikach biomasy. Ponadto w przypadku prowadzenia „czystej” technologii (np. MBSBBR) konieczne jest utrzymywanie wyższych stężeń tlenu rozpuszczonego ($>5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$) niż w układzie hybrydowym.

Analizowane w pracy sekwencyjne reaktory z błoną biologiczną poparte licznymi badaniami, najczęściej laboratoryjnymi, wykazują wysoką efektywność zintegrowanego usuwania C, N, P i skłaniają do rozważania technologii SBBR podczas modernizacji systemów porcjowych. Jak dotąd tylko niewielka liczba rozwiązań systemów SBBR zaowocowała wdrożeniem w skali technicznej bądź przemysłowej.

Literatura

1. Antileo C. et al.: Novel operational strategy for partial nitrification to nitrite in a sequencing batch rotating disk reactor. *Biochem. Eng. Journal*, 2006, 32, 69-78.
2. Arnold E., Böhm B., Wilderer P.A.: Application of activated sludge and biofilm sequencing batch reactor technology to treat reject water from sludge dewatering systems: a comparison. *Wat. Sci. Tech.*, 2000, 41(1), 115-122.
3. Arnz P., Arnold E., Wilderer P.A.: Enhanced biological phosphorus removal in a semi full-scale SBBR. *Wat. Sci. Tech.*, 2001, 43(3), 167-174.
4. Bever J., Stein A., Teichmann H.: Zaawansowane metody oczyszczania ścieków. Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz 1997.
5. Brenner A., Ben-Shushan N., Siegel M.H., Merchuk J.C.: Pilot plant performance and model calibration of a sequencing batch air-lift reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 1997, 35(1), 121-128.
6. Brinke-Seiferth S., Behrendt J., Sekoulov I.: The biofilm filter sequencing batch reactor (BFSBR). *Wat. Sci. Tech.*, 1999, 39(8), 77-83.
7. Buitrón G., Melgoza R.M., Jiménez L.: Pharmaceutical wastewater treatment using an anaerobic/anaerobic sequencing batch biofilter. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 2003, 38(10), 2077-2088.
8. Buitrón G., Soto G., Vite G., Moreno J.: Strategies to enhance the biodegradation of toxic compounds using discontinuous processes. *Wat. Sci. Tech.*, 2001, 43(3), 283-290.
9. Castillo P.A., González-Martínez S., Tejero I.: Observations during start-up of biological phosphorus removal in biofilm reactors. *Wat. Sci. Tech.*, 2000, 41(4-5), 425-432.
10. Chandrasekhara Rao N., Venkata Mohan S., Muralikrishna P., Sarma P.N.: Treatment of composite chemical wastewater by aerobic GAC-biofilm sequencing batch reactor (SBGR). *J. Hazard. Mater.*, 2005, B124, 59-67.
11. Cho B.C., Chang C.N., Liaw S.L., Huang P.T.: The feasible sequential control strategy of treating high strength organic nitrogen wastewater with sequencing batch biofilm reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 2001, 43(3), 115-122.
12. Di Iaconi C., Ramadori R., Lopez A.: Combined biological and chemical degradation for treating a mature municipal landfill leachate. *Biochem. Eng. Journal*, 2006, 31, 118-124.
13. Di Iaconi C., Ramadori R., Lopez A., Passino R.: Aerobic granular sludge systems: The new generation of wastewater treatment technologies. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2007, 46, 6661-6665.
14. Di Iaconi C., Ramadori R., Lopez A., Passino R.: Influence of hydrodynamic shear forces on properties of granular biomass in a sequencing batch biofilter reactor. *Biochem. Eng. Journal*, 2006, 30, 152-157.
15. Di Iaconi C., Lopez A., Ramadori R., Di Pinto A.C., Passino R.: Combined chemical and biological degradation of tannery wastewater by a periodic submerged filter (SBBR). *Wat. Res.*, 2002, 36, 2205-2214.

16. Dulkadiroglu H., Cokgor E.U., Artan N., Orhon D.: The effect of temperature and sludge age on COD removal and nitrification in a moving bed sequencing batch biofilm reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 2005, 51(11), 95-103.
17. Garzón-Zúñiga M.A., González-Martínez S.: Biological phosphate and nitrogen removal in a biofilm sequencing batch reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 1996, 34(1-2), 293-301.
18. Gieseke A., Arnz P., Amann R., Schramm A.: Simultaneous P and N removal in a sequencing batch biofilm reactor: insights from reactor and microscale investigations. *Wat. Res.*, 2002, 36, 501-509.
19. Grady C.P.L. Jr., Daigger G.T., Lim H.C.: Biological wastewater treatment, 2nd ed. Revised and Expanded. Marcel Dekker Inc., New York 1999.
20. Helness H., Ødegaard H.: Biological phosphorus and nitrogen removal in a sequencing batch moving bed biofilm reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 2001, 43(1), 233-240.
21. Helness H., Ødegaard H.: Biological phosphorus removal in a sequencing batch moving bed biofilm reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, 40(4-5), 161-168.
22. Jung J.Y., Son D.H., Yeom I.T., Chung Y.C.: The role of zeolite in the nitrogen removal process and treatment of ammonium-rich wastewater using sequencing batch biofilm reactor (SBBR). *Zeolite '06 – 7th International Conference on the Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites*. Sorocco-New Mexico-USA, 16-21 July 2006. Edited by R.S. Bowman and S.E. Delap. Book of Abstracts, 146-147.
23. Kern-Jespersen J.P., Henze M., Strube R.: Biological phosphorus release and uptake under alternating anaerobic and anoxic conditions in a fixed film reactor. *Wat. Res.*, 1994, 28(5), 1252-1255.
24. Kim H., Rhu D., Hwang H., Choi E.: Performance of a hybrid SBR with fixed bed and suspended growth. *Wat. Sci. Tech.*, 2003, 48(11-12), 309-317.
25. Koc-Jurczyk J.: The influence of technological parameters on effectiveness of nitrogen removal from leachate in SBR reactors. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2007, 16(2A), 556-558.
26. Li J., Xing X.H., Wang B.Z.: Characteristics of phosphorus removal from wastewater by biofilm sequencing batch reactor (SBR). *Biochem. Eng. Journal*, 2003, 16, 279-285.
27. Li J., Peng Y., Gu G., Wei S.: Factors affecting simultaneous nitrification and denitrification in an SBBR treating domestic wastewater. *Front. Environ. Sci. Engin.*, 2007, 1(2), 246-250.
28. Lindemann J., Wiesmann U.: Single-disc investigations on nitrogen removal of higher loads in sequencing batch and continuously operated RDR systems. *Wat. Sci. Tech.*, 2000, 41(4-5), 77-84.
29. Loukidou M.X., Zouboulis A.I.: Comparison of two biological treatment processes using attached-growth biomass for sanitary landfill leachate treatment. *Environ. Pollut.*, 2001, 111, 273-281.
30. Manoj Kumar B., Chaudhari S.: Evaluation of sequencing batch reactor (SBR) and sequencing batch biofilm reactor (SBBR) for biological nutrient removal from simulated wastewater containing glucose as carbon source. *Wat. Sci. Tech.*, 2003, 48(3), 73-79.

31. Miksch K.: Biotechnologia w inżynierii środowiska. Mat. IX Międzynarodowej Konferencji „Nauka i technika w restrukturyzacji regionów przemysłowych”, Gliwice 25-27 października 1999 r., 17.
32. Morgenroth E., Wilderer P.A.: Controlled biomass removal – the key parameter to achieve enhanced biological phosphorus removal in biofilm systems. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, 39(7), 33-40.
33. Morgenroth E., Wilderer P.A.: Modeling of enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch biofilm reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 1998, 37(4-5), 583-587.
34. Muñoz-Colunga A., González-Martínez S.: Effects of population displacements on biological phosphorus removal in a biofilm SBR. *Wat. Sci. Tech.*, 1996, 34(1-2), 303-313.
35. Müller N.: Implementing biofilm carriers into activated sludge process – 15 years of experience. *Wat. Sci. Tech.*, 1998, 37(9), 167-174.
36. Ødegaard H., Gisvold B., Strickland J.: The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process. *Wat. Sci. Tech.*, 2000, 41(4-5), 383-391.
37. Pambrun V., Paul E., Spérandio M.: Treatment of nitrogen and phosphorus in highly concentrated effluent in SBR and SBBR processes. *Water Sci Tech.*, 2004, 50(6), 269-276.
38. Pastorelli G., Canziani R., Pedrazzi L., Rozzi A.: Phosphorus and nitrogen removal in moving-bed sequencing batch biofilm reactors. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, 40(4-5), 169-176.
39. Podedworna J., Żubrowska-Sudoł M.: Efektywność oczyszczania ścieków komunalnych w reaktorze SBR ze złożem ruchomym. Seminarium nt.: „Technologia oczyszczania ścieków w reaktorach SBR – teoria i praktyka”, Warszawa 10 grudnia 2007 r. Wydaw. Seidel Przywecki.
40. Podedworna J., Żubrowska-Sudoł M.: Wstępne doświadczenia w usuwaniu azotu i fosforu w sekwencyjnym reaktorze porcjowym ze złożem zawieszonym. *GWITS*, 2001, 11, 398-405.
41. Rodgers M., Zhan X.M., Prendergast J.: Wastewater treatment using a vertically moving biofilm system followed by a sand filter. *Process Biochem.*, 2005, 40, 3132-3136.
42. Rodziejewicz J., Filipkowska U., Krzemieniewski M.: Effect of aeration on the efficiency of wastewater treatment in a reactor with immobilized biomass. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2007, 16(2A), 505-508.
43. Rodziejewicz J., Filipkowska U., Krzemieniewski M.: Effect of current on changes of nitrogen compounds in a reactor with immobilized biomass. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2007, 16(3B), 423-425.
44. Rovatti M., Nicoletta C., Converti A., Ghigliazza R., di Felice R.: Phosphorus removal in fluidized bed biological reactor (FBBR). *Wat. Res.*, 1995, 29, 2627-2634.
45. Shin H.S., Park H.S.: Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor (PBCSBR). *Wat. Sci. Tech.*, 1991, 23(4-6), 719-728.
46. Sirianuntapiboon S., Yommee S.: Application of a new type of moving biofilm in aerobic sequencing batch reactor (aerobic-SBR). *J. Environ. Manag.*, 2006, 78, 149-156.

47. Sirianuntapiboon S., Jeeyachok N., Larplai R.: Sequencing batch reactor biofilm system for treatment of milk industry wastewater. *J. Environ. Manag.*, 2005, 76, 177-183.
48. Stoodley P., Sauer K., Davies D.G., Costerton J.W.: Biofilms as complex differentiated communities. *Annual Rev. Microbiol.*, 2002, 56, 187-209.
49. Tengrui L., Al-Harbawi A.F., Bo L.M., Jun Z., Long X.Y.: Characteristics of nitrogen removal from old landfill leachate by sequencing batch biofilm reactor. *American J. App. Sci.*, 2007, 4(4), 211-214.
50. Terada A., Yamamoto T., Tsuneda S., Hirata A.: Sequencing batch membrane biofilm reactor for simultaneous nitrogen and phosphorus removal: Novel application of membrane-aerated biofilm. *Biotechnol. Bioeng.*, 2006, 94(4), 730-739.
51. Tomaszek J.A.: Azot i fosfor w środowisku i technologiach środowiskowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
52. Tomaszek J.A.: Comparison between sequencing batch and continuous flow activated sludge systems. *Chemistry for the protection of the environment 4. Environ. Sci. Res.*, 2005, 59, 275-285.
53. Tran H.T., Kim D.H., Jia Y.H., Oh S.J., Ahn D.H.: A study on start-up operation of fixed-bed biofilm sequencing batch reactor (FbSBR) for piggery wastewater treatment. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2007, 13(6), 985-991.
54. Valvidia A., González-Martínez S., Wilderer P.A.: Biological nitrogen removal with three different SBBR. *Wat. Sci. Tech.*, 2007, 55(7), 245-254.
55. Venkata Mohan S., Chandrasekhara Rao N., Sarma P.N.: Low-biodegradable composite chemical wastewater treatment by biofilm configured sequencing batch reactor (SBBR). *J. Hazard. Mater.*, 2007, 44, 108-117.
56. Wang B., Li J., Wang L., Nie M., Li J.: Mechanism of phosphorus removal by SBR submerged biofilm system. *Wat. Res.*, 1998, 32(9), 2633-2638.
57. Wiesmann U., Choi I.S., Dombrowski E.M.: Fundamentals of biological wastewater treatment. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2007.
58. Wilderer P.A., Irvine R.L., Goronszy M.C.: Sequencing batch reactor technology. Scientific and Technical Report No 10. IWA Publishing, London 2001.
59. Zhang Z., Zhou J., Wang J., Guo H., Tong J.: Integration of nitrification and denitrifying dephosphatation in airlift loop batch biofilm reactor. *Process Biochem.*, 2006, 41, 599-608.
60. Żubrowska-Sudoł M.: Zastosowanie złoża ruchomego (moving bed) w technologii oczyszczania ścieków. *GWiTŚ*, 2004, 7-8, 266-269.
61. Żubrowska-Sudoł M., Podedworna J.: Stężenie tlenu rozpuszczonego a efektywność eliminacji związków węgla, azotu i fosforu w sekwencyjnym reaktorze porcjowym ze złożem ruchomym (MBSBBR). *GWiTŚ*, 2004, 2, 62-69.

Wykaz skrótów i oznaczeń

ALSBBR – *Airlift Loop Sequencing Batch Biofilm Reactor* – sekwencyjny air-lift reaktor porcjowy ze złożem biologicznym w postaci włókien

BFSBR – *Biofilm Filter Sequencing Batch Reactor* – sekwencyjny biofiltr porcjowy

DNPAOs	– <i>Denitrifying Phosphate Accumulating Organisms</i> – denitryfikacyjne mikroorganizmy akumulujące polifosforany
FBBR-SBR	– <i>Fluidized Bed Biological Reactor as Sequencing Batch Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z fluidalnym złożem biologicznym
GAC-SBBR	– <i>Granular Activated Carbon-Sequencing Batch Biofilm Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z ruchomym złożem biologicznym wytworzonym na węglu aktywnym
MBSBBR	– <i>Moving Bed Sequencing Batch Biofilm Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z ruchomym złożem biologicznym
PBCSBR	– <i>Porous Biomass Carrier Sequencing Batch Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z porowatym nośnikiem biomasy
SBALR	– <i>Sequencing Batch Air-lift Reactor</i> – sekwencyjny air-lift reaktor porcjowy
SBB-AC	– <i>Sequencing Batch Biofilter Activated Carbon</i> – sekwencyjny biofiltr porcjowy z węglem aktywnym
SBBGR	– <i>Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor</i> – sekwencyjny biofiltr porcjowy z osadem granulowanym
SBBR	– <i>Sequencing Batch Biofilm Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z błoną biologiczną
SBMBfR	– <i>Sequencing Batch Membrane Biofilm Reactor</i> – sekwencyjny membranowy reaktor porcjowy ze złożem biologicznym
SBRDR	– <i>Sequencing Batch Rotating Disc Reactor</i> – sekwencyjne porcjowe złożo dyskowe
SB-SBR	– <i>Submerged Biofilm Sequencing Batch Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy ze złożem zanurzonym
SFBR-SBR	– <i>Submerged Fixed Bed Reactor-SBR</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy ze stałym złożem zanurzonym
SND	– symultaniczna nitryfikacja/denitryfikacja
VMSBBR	– <i>Vertically Moving Sequencing Batch Biofilm Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z pionowo ruchomym złożem biologicznym
Z-SBBR	– <i>Zeolite Sequencing Batch Biofilm Reactor</i> – sekwencyjny reaktor porcjowy z ruchomym złożem biologicznym wytworzonym na zeolicie

A LITERATURE REVIEW OF NEW TYPES OF SEQUENCING BATCH BIOFILM REACTORS

Abstract

The paper presents literature review of new types of sequencing batch biofilm reactors in respect of integrated removal of carbon, nitrogen and phosphorus from wastewater. The article contains a extensive review of biofilm reactors with moving bed, fixed bed and periodically submerged fixed bed operated as a sequencing batch reactor. On basis of information analysis contain in literature it was been possible to affirm that efficiency of SBBR systems on different level were obtained. A literature analysis demonstrated a high potential of wastewater treatment in SBBR systems.

Wpłynęło do Oficyny Wydawniczej w marcu 2009 r.