

Adam Masłoń

Janusz A. Tomaszek

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza

SEKWENCYJNE REAKTORY PORCJOWE W OCZYSZCZANIU ŚCIEKÓW

Abstrakt

Biologiczne oczyszczanie ścieków realizowane jest najczęściej w układach z osadem czynnym. Technologia osadu czynnego sprawdziła się jako ekonomiczna oraz wydajna i realizowana jest najczęściej jako metoda przepływowa. Alternatywą dla przepływowych metod osadu czynnego są sekwencyjne reaktory porcjowe SBR. Na podstawie dostępnej literatury i badań własnych dokonano w pracy oceny przydatności sekwencyjnych reaktorów porcjowych w technologii ścieków. Reaktory porcjowe są z powodzeniem wykorzystywane do oczyszczania ścieków komunalnych i przemysłowych, odcieków ze składowisk odpadów oraz wód osadowych generowanych podczas przeróbki osadów ściekowych.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, sekwencyjny reaktor porcjowy SBR

SEQUENCING BATCH REACTOR IN WASTEWATER TREATMENT

Abstract

The biological wastewater treatment is mostly realized in activated sludge systems. The activated sludge technology came true as economic and effective and he is mostly used as the continuous flow method. Sequencing batch reactors are alternative for the conventional flow activated sludge. On the basis of the accessible literature and own investigations were executed in the work of the opinion of the usefulness of the sequencing batch reactors in a wastewater technology. The sequencing batch reactors are used with the success to treatment of municipal and industrial wastewaters, municipal landfill leachate and sludge digester liquors generated during sludge treatment in WWTP.

Keywords: wastewater treatment, sequencing batch reactor SBR

1. Wprowadzenie

Wśród aktualnie stosowanych biologicznych systemów oczyszczania ścieków dominują przede wszystkim instalacje oparte na technologii osadu czynnego, która sprawdziła się jako ekonomiczna i wydajna, wobec czego zyskała powszechną akceptację. Najczęściej realizowana jest jako metoda przepływowa. Do tej pory opracowano szereg układów technologicznych umożliwiających usuwanie ze ścieków związków węgla, azotu i fosforu w tej metodzie. Systemy, takie jak Bardenpho, A/O i A2/O są znane i powszechnie stosowane najczęściej w dużych oczyszczalniach ścieków. Mimo wysokiej sprawności posiadają cały szereg uwarunkowań, które w znaczny sposób ograniczają możliwości ich stosowania. Alternatywą dla przepływowych metod osadu czynnego są sekwencyjne reaktory porcjowe SBR. Metoda ta z powodzeniem i dużym uznaniem stosowana jest od około dwudziestu lat.

Na podstawie dostępnej literatury i badań własnych dokonano w pracy oceny przydatności sekwencyjnych reaktorów porcjowych w technologii ścieków.

2. Charakterystyka technologii SBR

Przebieg periodycznego sposobu oczyszczania ścieków po raz pierwszy został przedstawiony w 1898 r. przez angielskiego inżyniera Thomasa Wardle'a. W latach 1914–1920 powstało w Anglii kilka oczyszczalni porcjowego działania m.in. w Salford, Sheffield, Worcester i Tunstall. Jednak ze względu na niedostatecznie rozwiniętą technikę sterowania w owym czasie proces oczyszczania ścieków osadem czynnym z wykorzystaniem reaktorów okresowego działania od czasu jego wynalezienia popadł na wiele lat w zapomnienie. W tym czasie nastąpił szybki rozwój metod przepływowych. W latach pięćdziesiątych XX w. ponownie wznowiono prace nad systemami biologicznego oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego o periodycznym sposobie pracy. Przykładem mogą być rowy biologiczne utleniające opracowane przez Pasveera. Dzięki wzmocnionym pracom badawczym w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia zostały początkowo w Stanach Zjednoczonych, a następnie w krajach Europy Zachodniej (głównie w Niemczech), opracowane naukowo i technicznie podstawy technologii określonej skrótem „SBR” (akronim z ang. *Sequencing Batch Reactor*). Jednak pierwszy pełnowymiarowy obiekt sekwencyjnymi reaktorami porcjowymi zbudowano dopiero w 1982 r. w Culver (Indiana, USA)¹ i od tego czasu datuje się intensywny rozwój technologii SBR^{2,3}. Jednym z czynników, który przyczyniał się do dużej ilości wdrożeń tej technologii od tamtej pory był bez wątpienia szybki postęp w dziedzinie nowoczesnych metod sterowania i automatyki procesem oczyszczania.

Idea technologii SBR polega na oczyszczaniu ścieków metodą osadu czynnego, przy czym przemiany biochemiczne oraz oddzielenie osadu czynnego od ścieków oczyszczonych zachodzą w tym samym zbiorniku (technologia jednokomorowa), a które następnie odprowadzane są z komory w sposób porcjowy. Działanie reaktora porcjowego

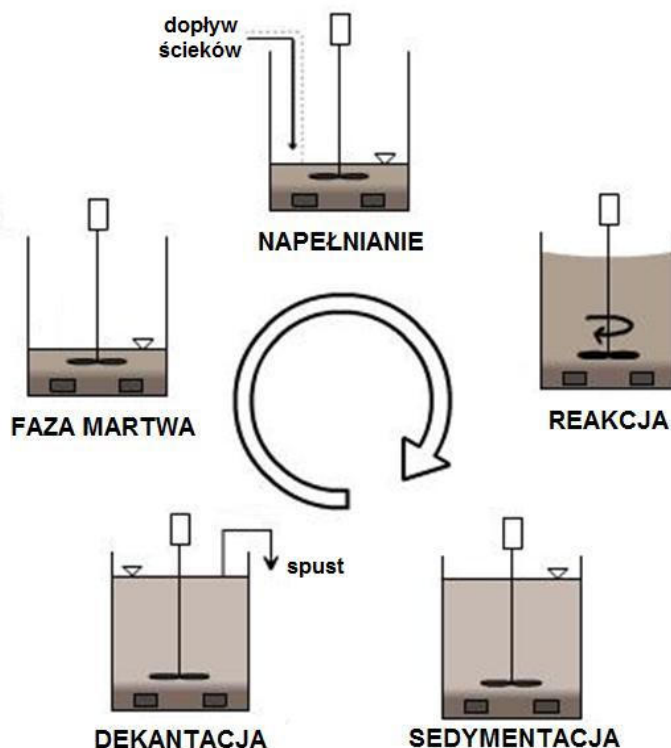
¹ S. Danesh, J. L. Sears, J. Barnard, J. A. Oleszkiewicz, *Biologiczne usuwanie związków biogenych w cyklicznych systemach SBR* [w:] Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej pt. „Usuwanie związków biogenych ze ścieków”, Kraków, 16–18 czerwca 1997.

² B. Teichgräber, *Sekwencyjne reaktory porcjowe – Projektowanie i zastosowanie*, GWiTS, 1998, nr 12, s. 522–531.

³ P. A. Wilderer, R. L. Irvine, M. C. Goronszy, *Sequencing batch reactor technology. Scientific and Technical Report No. 10*. IWA Publishing, London 2001.

SBR oparte jest na okresowym powtarzaniu się następujących kolejno po sobie faz: napełniania, reakcji (napowietrzania/mieszania), sedymentacji, dekantacji i tzw. fazy martwej (spoczynku) (ryc. 1). Okres obejmujący czas pomiędzy końcem dekantacji a początkiem kolejnego napełniania stanowi pełny cykl pracy reaktora porcjowego^{4,5}.

Ryc. 1. Koncepcja pracy reaktora SBR



Źródło: Opracowanie własne

W zależności od strategii działania technologię SBR cechuje wiele zalet czyniących z niej rozwiązanie konkurencyjne w odniesieniu do klasycznych systemów osadu czynnego lub układów z biofilmem (np. złoż biologicznych). Są to przede wszystkim^{6,7}:

- ♦ większa elastyczność pracy układu, możliwość dokonania szybkich zmian parametrów operacyjnych w zależności od ilości i składu dopływających ścieków,
- ♦ wysoka odporność na nierównomierność dopływu ścieków i zmienne ładunki zanieczyszczeń,
- ♦ mniejsza objętość reaktora potrzebna do prowadzenia procesów oczyszczania ścieków,

⁴ B. Teichgräber, *Sekwencyjne...*, op. cit.

⁵ N. Artan, D. Orhon, *Mechanism and Design of Sequencing Batch Reactors for Nutrient Removal. Scientific and Technical*, IWA Publishing, London 2005.

⁶ M. Mańczak, *Zalety i wady reaktorów okresowego działania – SBR*, Seminarium nt.: „Technologia oczyszczania ścieków w reaktorach SBR – teoria i praktyka”, Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.

⁷ J. A. Tomaszek, *Azot i fosfor w środowisku i technologiach środowiskowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.

- ♦ możliwość precyzyjnego utrzymywania stałego wieku osadu – podstawowy parametr technologiczny oczyszczalni z osadem czynnym,
- ♦ możliwość ograniczenia wzrostu bakterii nitkowatych i pęcznienia osadu czynnego,
- ♦ brak osadników wtórnych i pompowni recyrkulacji osadu oraz recyrkulacji azotanów,
- ♦ automatyczne sterowanie pracą reaktorów (pomiar *on-line*).

W porównaniu do systemów przepływowych zastosowanie reaktorów SBR pozwala w niektórych przypadkach w znaczny sposób zintensyfikować poszczególne procesy oczyszczania ścieków oraz wyeliminować mankamenty systemów konwencjonalnych. Z tego względu systemy porcjowe stają się wobec nich konkurencyjne. Tematykę oczyszczania ścieków w systemie SBR na przełomie ostatnich lat dokładnie przedstawiono w wielu pracach^{8, 9, 10, 11, 12, 13}. Poza klasycznym rozwiązaniem technologii SBR istnieje szereg niekonwencjonalnych rozwiązań, nazywanych często innowacyjnymi reaktorami porcjowymi¹⁴.

3. Celowość stosowania sekwencyjnych reaktorów porcjowych

W zależności od potrzeb technologicznych w sekwencyjnych reaktorach porcjowych mogą być realizowane procesy:

- ♦ usuwania związków organicznych,
- ♦ usuwania związków organicznych z nityfikacją azotu amonowego,
- ♦ usuwania związków organicznych z nityfikacją azotu amonowego i denityfikacją azotanów,
- ♦ usuwania związków organicznych z nityfikacją azotu amonowego, denityfikacją azotanów oraz biologiczną wzmoczoną defosfatacją, przy czym przy niedostatecznej biologicznej defosfatacji usuwanie fosforu ze ścieków można wspomagać za pomocą chemicznego strącania (tzw. symultaniczna defosfatacja chemiczna).

Algorytm pracy reaktora porcjowego (długość cyklu i czas trwania poszczególnych faz) oraz sposób dawkowania ścieków determinuje oczekiwane efekty oczyszczania ścieków.

Celowe jest przede wszystkim stosowanie reaktorów SBR wszędzie tam, gdzie występują znaczne wahania ilości ścieków oraz gwałtowne zmiany stężenia zanieczyszczeń w ściekach dopływających. Z uwagi na cykliczność prowadzenia operacji technologicznych oraz porcjowe odprowadzanie ścieków oczyszczalnie porcjowego działania wykazują wysoką odporność na obciążenia hydrauliczne i substratowe. Elastyczna praca reaktora SBR umożliwia jego łatwe dostosowanie do zmiennego obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń. Niedociążenia bądź przeciążenia hydrauliczne wynikające z nierównomierności dopływu w systemach z SBR-ami można minima-

⁸ P. A. Wilderer, R. L. Irvine, M. C. Goronszy, *Sequencing batch...*, op. cit.

⁹ W. Styka, J. Banaś, *Rozwój technologii SBR w ostatnim 20-leciu [w:] I Kongres Inżynierii Środowiska. Referaty problemowe*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 2002, 12, 363–390.

¹⁰ E. Klimiuk, M. Łebkowska, *Biotechnologia w ochronie środowiska*, PWN, Warszawa 2003.

¹¹ J. Podedworna, *Przegląd i ocena stanu badań nad oczyszczaniem ścieków w sekwencyjnych reaktorach porcjowych*, Inż. i Ochr. Środ., 2004, tom 7, nr 2, s. 227–247.

¹² N. Artan, D. Orhon, *Mechanism...*, op. cit.

¹³ J. A. Tomaszek, *Azot...*, op. cit.

¹⁴ A. Masłoń, J. A. Tomaszek, *Innowacyjne rozwiązania sekwencyjnych reaktorów porcjowych stosowane w oczyszczaniu ścieków*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska”, 2008, tom 11, nr 4, s. 431–453.

lizować poprzez zastosowanie w układzie technologicznym oczyszczalni zbiornika retencyjno-uśredniającego, zmiennego cyklu pracy w ciągu roku, lub zmiany dawkovania ścieków surowych na tryb ciągły lub półciągły.

Warto w tym miejscu jeszcze wspomnieć, że sekwencyjne reaktory porcjowe pełnią dosyć często rolę laboratoryjnego układu do badań nad procesami oczyszczania ścieków i właściwościami osadu czynnego. Reaktory porcjowe wykorzystywane są do modelowania i optymalizacji procesów jednostkowych biologicznego oczyszczania – nityfikacji, denityfikacji itp.

4. Zastosowanie technologii SBR do oczyszczania ścieków komunalnych

Sekwencyjne reaktory porcjowe mogą być wykorzystywane zarówno w przydomowych, indywidualnych, jak i zbiorczych systemach oczyszczania ścieków komunalnych. Oczyszczalnie z reaktorami SBR są projektowane w oparciu o indywidualne koncepcje, jak również są budowane w oparciu o komercyjne rozwiązania firm krajowych i zagranicznych. Zasady wymiarowania systemów porcjowych zostały opracowane w materiałach pomocniczych do projektowania ATV-M210P oraz w pracach^{15, 16, 17, 18, 19}. Poprawnie zaprojektowane, wybudowane i eksploatowane oczyszczalnie SBR gwarantują uzyskiwanie wymaganej efektywności oczyszczania ścieków. W systemach porcjowych możliwe jest uzyskanie nawet do 99% usunięcia węgla organicznego i do 95% związków biogenych, w tym całkowitą nityfikację azotu amonowego. W przypadku zintegrowanego usunięcia C, N i P uzyskuje się sprawność powyżej 90%^{20, 21}.

Oczyszczalnie ścieków komunalnych z reaktorami SBR charakteryzują się zwartą i kompaktową konstrukcją o niewielkich wymiarach. Stosowanie reaktorów porcjowych w układzie technologicznym pozwala na racjonalne zagospodarowanie terenu pod zabudowę z uwagi na zblokowanie funkcji procesowych. Wielofunkcyjność reaktora porcjowego pozwala wyeliminować konieczność budowy zbiornika osadnika wtórnego i pompowni osadu recyrkulowanego. Coraz częściej w układzie technologicznym z reaktorami SBR pomijany jest również osadnik wstępny²². Wskaźnik jednostkowego zapotrzebowania terenu pod budowę małej i średniej oczyszczalni ścieków typu SBR kształtuje się na poziomie 5–7,5 m²/m³·d²³. W zależności od konstrukcji reaktora oraz jego wyposażenia istnieje aktualnie kilkadziesiąt rynkowych rozwiązań systemów porcjowych. Komercyjne rozwiązania technologii SBR mogą być z powodzeniem wykorzystywane w szerokim spektrum przepustowości, od 1,0 nawet do kilku tysięcy m³/d. Charakterystyczna dla reaktorów SBR wysoka automatyka procesów technologicznych i zmechanizowanie wszystkich czynności eksploatacyjnych ograniczają pracę obsługi oczyszczalni do minimum. W przypadku systemów przydomowych oczyszczalnie SBR są obiektami bezobsługowymi.

¹⁵ B. Teichgräber, *Sekwencyjne...*, op. cit.

¹⁶ R. Kayser, *Komentarz ATV-DVWK do A131P i do M210P. Wymiarowanie jednostopniowych oczyszczalni ścieków z osadem czynnym oraz sekwencyjnych reaktorów porcjowych SBR*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2001.

¹⁷ N. Artan, D. Orhon, *Mechanism...*, op. cit.

¹⁸ J. A. Tomaszek, *Azot...*, op. cit.

¹⁹ Z. Heidrich, A. Witowski, *Urządzenia do oczyszczania ścieków*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.

²⁰ P. A. Wilderer, R. L. Irvine, M. C. Goronszy, *Sequencing batch...*, op. cit.

²¹ J. Podedworna, *Przegląd...*, op. cit.

²² B. Teichgräber, *Sekwencyjne...*, op. cit.

²³ M. Mańczak, *Zalety...*, op. cit.

W Polsce sekwencyjne reaktory porcjowe zdobyły dużą popularność przede wszystkim w zakresie małych i średnich oczyszczalni ścieków. Obiekty takie charakteryzują się nierównomiernym dopływem ścieków, zarówno w sensie ilościowym, jak i jakościowym. W takich przypadkach wszelkie zmiany natężenia przepływu i stężenia zanieczyszczeń w ściekach surowych mogą prowadzić do pogorszenia sprawności biologicznego oczyszczania, co z kolei przekłada się na gorszą jakość ścieków oczyszczonych. Zastosowanie zbiornika retencyjno-uśredniającego oraz sekwencja prowadzenia operacji technologicznych w oczyszczalniach SBR w zdecydowany sposób wpływa na odporność systemu na przeciążenia, dzięki czemu przebieg oczyszczania ścieków jest stabilniejszy. W systemach porcjowych możliwa jest również elastyczna zmiana parametrów pracy reaktora, gdy natężenie ścieków doprowadzanych do oczyszczalni charakteryzuje się wyjątkowo dużym współczynnikiem nierównomierności. Czas cyklu pracy reaktora porcjowego można dopasować do obciążenia hydraulicznego i substratowego. W przypadku oczyszczania ścieków komunalnych wynosi on zwykle od 6 do 8 h. Modyfikacja czasu pracy reaktora następuje poprzez jego wydłużenie bądź skrócenie. W niektórych przypadkach cykl pracy może zostać skrócony do 3 lub 4 godzin, bądź wydłużony do 12 godzin. W okresie dużych wahań ilości dopływających ścieków istnieje również możliwość włączania lub wyłączania poszczególnych reaktorów porcjowych. Każdy z nich może pracować niezależnie od pozostałych.

Technologia SBR doskonale sprawdza się w oczyszczalniach ścieków dla miejscowości o wysokim ruchu turystycznym, gdy istotne jest szybkie dopasowanie parametrów systemu w odniesieniu do sezonowych wahań dopływu ścieków. Zróżnicowana ilość ścieków w skali rocznej wymusza wprowadzenia odpowiedniej strategii pracy reaktorów SBR. Wówczas oczyszczalnia charakteryzuje się eksploatacją sezonową. Przykładowo w oczyszczalni ścieków w Juracie w okresie letnim przepustowość wynosi ok. 3400 m³/d (30 000 RLM), z kolei po sezonie sześciokrotnie mniej to jest ok. 500 m³/d (4500 RLM). Podobnie w przypadku oczyszczalni Swarzewo obsługującej miasto Władysławowo, Puck i inne nadmorskie miejscowości. Natężenie przepływu w okresie letnim wynosi 10 000 m³/d (100 000 RLM), natomiast po sezonie tylko 5000 m³/d (45 000 RLM). Oprócz przykładów przedstawionych powyżej, technologia SBR znajduje zastosowanie w oczyszczalniach ścieków w regionach turystycznych dla schronisk górskich, leśniczówek, ośrodków i pensjonatów wypoczynkowych oraz hoteli. Oczyszczalnie ścieków pracujące w oparciu o technologię SBR z powodzeniem funkcjonują od wielu lat w schroniskach PPTK m.in. w Tatrzańskim, Babiogórskim i Bieszczadzkim Parku Narodowym²⁴.

Komunalne oczyszczalnie ścieków SBR z uwagi na możliwość usuwania w nich związków biogenych mogą być efektywnie wykorzystywane w celu ochrony wód w zlewniach wrażliwych na eutrofizację^{25, 26}. Wobec tego celowe jest ich stosowanie oczyszczania ścieków w aspekcie ochrony przed eutrofizacją zbiorników zaporowych

²⁴ A. Mastoń, *Zastosowanie oczyszczalni ścieków SBR w aspekcie poprawy gospodarki ściekowej w regionach turystycznych* [w:] Rak J. R. (red), *Woda i surowce odnawialne a ich oddziaływanie na środowisko naturalne*, Wydawnictwo Muzeum Regionalnego im. A. Fastnachta, Brzozów 2011, s. 275–298.

²⁵ J. Banaś, W. Styka, *Zastosowanie oczyszczalni ścieków SBR do ochrony zbiorników wodnych na przykładzie zbiornika czorsztyńskiego*, VII Seminarium Naukowe „Ochrona jakości i zasobów wód”, Zakopane, 2–4 października 1996.

²⁶ W. Styka, *Oczyszczalnie ścieków typu SBR na obszarach wrażliwych na eutrofizację*, „Czasopismo Techniczne. Środowisko”, nr 100, z. 7, s. 275–293.

i jezior. Znane są liczne przykłady zlokalizowania oczyszczalni ścieków SBR w miejscowościach położonych nad zbiornikiem czorsztyńskim (Niedzica, Frydman) czy nad jeziorem Mikołajskim (Mikołajki).

Liczne doniesienia literatury potwierdzają w pełni przydatność technologii SBR w zakresie małych i średnich oczyszczalni ścieków^{27, 28, 29, 30, 31, 32}. Przyjęło się, że dla terenów wiejskich z racji braku konieczności usuwania związków biogenych ze ścieków celowe jest zastosowanie mechaniczno-biologicznej oczyszczalni z wykorzystaniem reaktorów o działaniu porcjowym^{33, 34}. W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia w Polsce południowo-wschodniej wybudowano dla małych miast i gmin wiejskich kilkadziesiąt oczyszczalni ścieków, wśród których były obiekty oparte o technologię SBR^{35, 36}.

W województwie podkarpackim istnieje blisko 40 oczyszczalni ścieków komunalnych, w których zastosowano sekwencyjne reaktory porcjowe (tab. 1). Powstały one w latach dziewięćdziesiątych w celu ochrony zlewni Sanu i Wisły przed zanieczyszczeniami. Część z nich została zmodernizowana po roku 2000. Przepustowość ich nie przekracza 800 m³/d. Niemal wszystkie obiekty pracują w podobnym układzie technologicznym. Część mechaniczna składa się z kraty koszowej lub workowej i piaskownika. Reaktory porcjowe SBR, poprzedzone zbiornikami retencyjnymi, stanowią kolejny, biologiczny stopień oczyszczania ścieków. W układzie technologicznym wszystkich przedmiotowych obiektów pominięto stosowanie osadnika wstępnego. W przypadku zawiesiny w ściekach surowych w ilości < 200 mg·dm³ ma to uzasadnienie technologiczne, to w przypadku dużych stężeń zawiesiny mogą wystąpić problemy eksploatacyjne. Gospodarka osadowa w wybranych oczyszczalniach Podkarpacia jest również podobna. Powszechnie stosuje się stabilizację tlenową, zagęszczanie grawitacyjne i odwadnianie w workownicach Drainad.

²⁷ J. A. Tomaszek, *Wysokoefektywne usuwanie związków C, N i P w reaktorach SBR województwa podkarpackiego*, III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Postęp w inżynierii środowiska” Rzeszów–Polańczyk, 25–27 września 2003, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 167–172.

²⁸ W. Miernik, *Skuteczność oczyszczania ścieków wiejskich w oczyszczalni z reaktorem o działaniu sekwencyjnym*, Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, 2007, nr 2, s. 71–80.

²⁹ T. Siwiec, *Analiza pracy małych oczyszczalni ścieków na przykładzie wybranych oczyszczalni typu SBR*, „Przegląd Komunalny”, 2004, nr 7 (154), s. 45–48.

³⁰ Z. Wasąg, *Optimalizacja procesu oczyszczania ścieków w oczyszczalni gminnej*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych”, 2008, z. 526, s. 473–479.

³¹ A. Masłoń, *Ocena efektywności wybranych oczyszczalni ścieków typu SBR w Polsce południowo-wschodniej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, nr 276, z. 58, s. 203–214.

³² M. Kida, A. Masłoń, J. A. Tomaszek, *Ocena funkcjonowania oczyszczalni ścieków w Radgoszczy*, XXXII Międzynarodowe Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA 2012 nt.: „Problemy Inżynierii Środowiska”, Plock, 31 maja – 1 czerwca 2012.

³³ Z. Heidrich, *Kierunki rozwiązań systemów kanalizacyjnych na terenach wiejskich*, „Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska”, 2005, nr 2 (32), s. 147–152.

³⁴ P. Koszelnik, A. Masłoń, *Ochrona wód i gospodarka ściekowa w jednostkach osadniczych poniżej 2000 RLM (2)*, „Aura”, 2012, nr 5, s. 14–18.

³⁵ J. Banaś, W. Styka, *Wysokoefektywne...*, op. cit.

³⁶ W. Styka, J. Banaś, *Rozwój...*, op. cit.

Tab. 1. Wybrane oczyszczalnie ścieków z reaktorem SBR w województwie podkarpackim

Miejscowość	Typ	Ilość ścieków, RLM	Technologia	Gospodarka osadami
1	2	3	4	5
Błazowa	SBR	300 m ³ /d	Sito bębnowe, zbiornik buforowy V=56,8 m ³ , reaktor biologiczny V=65 m ³ , występują 2 cykle 12-godzinne, komora chemiczna V=185 m ³ (strącanie fosforu za pomocą koagulantu PIX)	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad-1
Chłopice	BIOVAC typ 0265-1	212 m ³ /d, 1228 RLM	Krata 2-workowa, zbiornik retencyjny V=50 m ³ , 2 reaktory SBR V=65 m ³ , cykl 5-fazowy, 6-godzinny, zbiornik do tlenowej stabilizacji osadów typu Biovac, usuwanie fosforu przy pomocy PIX	Stabilizacja tlenowa, odwadnianie Draimad-3
Dębno	BIOVAC typ 0315-1	100 m ³ /d, 400 RLM	Krata 2-workowa, zbiornik retencyjny, 2 reaktory SBR, zbiornik do tlenowej stabilizacji osadów typu Biovac. Cykl oczyszczania 5-fazowy, 6-godzinny	Stabilizacja tlenowa, odwadnianie Draimad-3
Harasiuki	BIOVAC typ 0260-1	200 m ³ /d	Krata 2-workowa, zbiornik retencyjny V=50 m ³ , 2 reaktory SBR V=60 m ³ , cykl 5-fazowy, 6-godzinny, zbiornik do tlenowej stabilizacji osadów typu Biovac, usuwanie fosforu przy pomocy PIX	Stabilizacja tlenowa, odwadnianie Draimad-3
Kołaczyce	SBR	350 m ³ /d, 1210 RLM	Krata koszowa, przepompownia ścieków surowych, dwukomorowy reaktor SBR V=700 m ³ , cykl 6-godzinny, 6-fazowy	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad-6
Lutowiska	BIOVAC typ 0615-2	120 m ³ /d	Krata workowa, piaskownik pionowy, zbiornik retencyjny V=45 m ³ , 3 reaktory SBR V=30 m ³ , cykl 5-fazowy, 6-godzinny, zbiornik do tlenowej stabilizacji osadów typu Biovac, usuwanie fosforu przy pomocy PIX	Stabilizacja tlenowa, odwadnianie Draimad-3
Nagawczyna Południe	Eko-Clear	150 m ³ /d, 1170 RLM	Krata koszowa, dwukomorowy reaktor Eko-Clear, cykl 6-fazowy, 4-godzinny (przesunięcie 2-godzinne)	Zagęszczanie, stabilizacja osadu
Nagawczyna Północ	Eko-Clear/II	150 m ³ /d, 1170 RLM	Krata koszowa, piaskownik, 2 reaktor Eko-Clear, cykl 6-fazowy, praca zmienna 6–12 godzin	Zagęszczanie
Niebylec	IGLOO-SBR	200 m ³ /d, 247 RLM	Krata koszowa, 2 piaskowniki wirowe, dwukomorowy reaktor SBR V=100 m ³ ; cykl 6-godzinny, 6-fazowy, symultaniczna defosfatacja przy pomocy PIX.	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad
Nowy Żmigród	SBR	500 m ³ /d	Krata koszowa, 2 piaskowniki pionowe, zbiornik retencyjny, 2 reaktory SBR V=540 m ³ , cykl 6-godzinny	Tlenowa stabilizacja, zagęszczanie grawitacyjne, odwadnianie na prasie filtracyjnej
Podgrodzie	IGLOO-SBR	45 m ³ /d, 280 RLM	Zbiornik uśredniający, krata koszowa, 3 reaktory SBR	Zagęszczanie
Radomyśl Wielki	IGLOO-SBR	200 m ³ /d, 1401 RLM	Krata koszowa z wkładką z worka hydrofobowego, piaskownik przedmuchiwany, dwukomorowy reaktor SBR, cykl 8-godzinny	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad
Raniżów	SBR	300 m ³ /d, 884 RLM	Krata koszowa, piaskownik pionowy, 2 reaktory SBR V=150 m ³ , cykl 6-godzinny, 6-fazowy	Stabilizacja, zagęszczanie, odwadnianie Draimad-6
Sadkowa Góra	IGLOO-SBR	250 m ³ /d, 330 RLM	Krata koszowa, piaskownik poziomy, 2 reaktory SBR V=125 m ³ , cykl 5-fazowy, 6-godzinny	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad-3
Sędziszów Małopolski	SBR	650 m ³ /d, 4500 RLM	Krata schodkowa, piaskownik poziomy – wirowy, komora rozdzielcza, dwukomorowy reaktor SBR, cykl 4-godzinny	Zagęszczanie, odwadnianie na prasie filtracyjnej
Straszęcin	SBR	450 m ³ /d, 2820 RLM	Krata koszowa, zbiornik retencyjny, 3 piaskowniki pionowe, 3 reaktory SBR V=150 m ³ , cykl 6-godzinny, 5-fazowy	Zagęszczanie, odwadnianie „Workes 6”
Ulanów	SBR	600 m ³ /d, 1457 RLM	Krata, piaskownik pionowy, zbiornik retencyjny V=212 m ³ , 2 reaktory SBR V=257 m ³ , cykl 6-godzinny, 2 komory chemiczne V=178 m ³ (strącanie fosforu – PIX).	Zagęszczanie, poletko osadu
Warzyce	SBR EKO	180 m ³ /d, 635 RLM	Krata koszowa, piaskownik poziomy, reaktor SBR cykl 6-godzinny	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad

Miejscowość	Typ	Ilość ścieków, RLM	Technologia	Gospodarka osadami
1	2	3	4	5
Zamiechów	BIOVAC typ 0265-1	212 m ³ /d, 1643 RLM	Krata 2-workowa, zbiornik retencyjny V=50 m ³ , 2 reaktory SBR V=65 m ³ , cykl 5-fazowy, zbiornik do tlenowej stabilizacji osadów typu Biovac (strącanie fosforu – PIX)	Stabilizacja tlenowa, odwadnianie Draimad-3
Zawada	Eko-Clear/II	250 m ³ /d, 1644 RLM	Sito bębnowe, 2 reaktory Eko Clear Vcałk=423 m ³ , cykl 6-fazowy, 6-godzinny	Zagęszczanie, odwadnianie Draimad
Zawierzbie	SBR	120 m ³ /d, 180 RLM	Krata koszowa, dwukomorowy reaktor SBR (niskoobciążony proces osadu czynnego ze stabilizacją osadu), niezależne cykle technologiczne z 2-godzinnym przesunięciem	Stabilizacja, zagęszczanie z napowietrzaniem, odwadnianie

Źródło: Opracowanie własne

W podkarpackich oczyszczalniach osiągnięto w roku 2000 sprawność usuwania substancji organicznych określoną wskaźnikami BZT₅ i ChZT na poziomie, odpowiednio, 76,6–98,0% oraz 66,8–93,2% oraz usunięcie zawiesiny ogólnej w zakresie 69,1–99,2%. Efektywność mierzona jakością ścieków oczyszczonych w wybranych oczyszczalniach ścieków na Podkarpaciu zestawiono w tabeli 2. Mimo że analizowane oczyszczalnie ścieków nie są zobligowane do usuwania związków biogenych ze ścieków, to w łatwym stopniu mogą być dostosowane do usuwania tych zanieczyszczeń. Efektywność podkarpackich oczyszczalni porcjowego działania jest zbieżna do efektywności analogicznych obiektów w Polsce prezentowanych w literaturze^{37, 38, 39, 40}.

Tab. 2. Jakość ścieków oczyszczonych w wybranych oczyszczalniach SBR

Oczyszczalnia	BZT ₅ [mg O ₂ /dm ³]	ChZT [mg O ₂ /dm ³]	Azot ogólny [mg N/dm ³]	Azot amonowy [mg N/dm ³]	Fosfor ogólny [mg P/dm ³]	Zawiesina ogólna [mg/dm ³]
Błażowa	24,4	73,2	44,6	31,7	6,3	14,0
Chłopice	8,0–23,0	66,0–81,0	–	–	–	16,0–35,0
Dębno	20,7	94,0	–	–	–	50
Harasiuki	22,5	50,1	37,8	18,6	2,5	5,25
Kołaczyce	30	131,0	10,9	–	4,5	15,4
Lutowiska	2,4–18,0	34,0–55,0	–	–	–	2,5–8,3
Nagawczyna Południe	15,0	75,0	–	–	–	15,8
Nagawczyna Północ	29,0	110,0	–	–	–	18,4
Niebylec	4,8–5,3	35,0–54,0	13,0–23,0	–	0,58–2,4	5,7–15,0
Nowy Żmigród	–	35,6–57,2	4,5–12,3	0,02–10,7	3,5–12,1	–
Paszczyna	4,0	38,0	–	–	–	5,8
Podgrodzie	23,6	108,4	–	–	–	38,8
Radomyśl Wielki	16,7–83,0	58,0–251,0	24,0–58,0	30–40,52	4,2–5,1	2,0–146,2
Raniżów	13,0–87,0	52,0–270,0	–	–	–	10,0–45,0

³⁷ P. Bugajski, R. Ślizowski, *Ocena działania oczyszczalni ścieków typu SBR w Sterkowcu-Zajazie*, „Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich”, 2006, nr 2 (2), s. 77–86.

³⁸ T. Siwiec, *Analiza...*, op. cit.

³⁹ W. Miernik, *Skuteczność...*, op. cit.

⁴⁰ A. Masłoi, *Ocena...*, op. cit.

Sadkowa Góra	14,4	56,5	7,5	1,7	2,75	15,0
Sędziszów Młp.	18,0–32,0	92,0–130,0	–	–	–	18,0–32,0
Straszęcin	2,3–4,1	13,2–43,4	–	–	–	4,4–13,0
Ulanów	21,5–26,2	–	12,4–15,3	4,2–5,5	3,63–4,7	17,5–34,5
Warzyce	26,2	95,5	25,2	5,9	1,9	28,0
Zamiechów	20,0–62,0	98,0–239,0	–	–	–	30,0–110,0
Zawada	14,8	97,5	–	–	–	19,6

Źródło: Opracowanie własne

Heidrich uważa, że technologia SBR powinna być stosowana tylko dla małych i średnich przepustowości⁴¹. Zaprzeczeniem tej teorii jest aplikacja na całym świecie kilkudziesięciu oczyszczalni ścieków o wielkości > 100 000 RLM (tab. 3). Największymi oczyszczalniami ścieków komunalnych periodycznego działania są obiekty w Bagdadzie i Nanjing pracujące w systemie LUCAS® (*Leuven University Cyclic Activated Sludge*)⁴². Również i w Polsce tendencja się zmienia. W ostatnich latach poddane zostały modernizacji w celu zwiększenia przepustowości trzy duże oczyszczalnie ścieków z reaktorami porcjowymi: w Rabce (11 500 m³/d, 36 175 RLM), Nowym Targu (24 000 m³/d, 156 000 RLM), Żywcu (42 000 m³/d, 209 000 RLM). W najbliższym czasie również oczyszczalnia ścieków w Łebie zostanie rozbudowana do wielkości 95 000 RLM. W Tychach-Urbanowicach funkcjonuje z kolei oczyszczalnia ścieków komunalnych, w której zastosowano reaktory SBR nazwane C-TECH, w których następuje oczyszczanie 50% ścieków dopływających (16 500 m³/d). Pozostała część dopływających ścieków jest oczyszczana w przepływowej komorze osadu czynnego.

Tab. 3. Wybrane oczyszczalnie ścieków porcjowego działania o wielkości > 100 000 RLM

Miasto	Wielkość oczyszczalni	Uwagi
Poczdám (Niemcy)	90 000 RLM	CYCLAZUR™
Koprivnica (Chorwacja)	100 000 RLM	Biogest
Bajkał (Rosja)	100 000 RLM (60 000 m ³ /d)	Biogest
Tanan (Egipt)	100 000 m ³ /d	Biogest
Yinchuan (Chiny)	100 000 m ³ /d	–
Uster (Szwajcaria)	150 000 m ³ /d	Biogest
Quarkers Hill (Australia)	200 000 RLM	–
Bangkok (Tajlandia)	480 000 RLM (200 000 m ³ /d)	CASS™
Dublin (Irlandia)	320 000 m ³ /d	ICEAS®
Black Rock (Australia)	400 000 RLM	–
Antwerpia (Belgia)	100 000 RLM	LUCAS®
Charleroi (Belgia)	200 000 RLM	LUCAS®
Taipa – Macau (Chiny)	300 000 RLM	LUCAS®

⁴¹ Z. Heidrich, *Przepływowe czy sekwencyjne (SBR) reaktory biologiczne z osadem czynnym*, Seminarium nt.: „Technologia oczyszczania ścieków w reaktorach SBR – teoria i praktyka”, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.

⁴² N. Philips, M. Tserashchuk, B. Verrecht, S. Wyffels, R. Gerards, L. Vriens, *Design of Large Municipal Waste Water Treatment Plants using latest SBR technology: case studies Macau – China (500 000 PE) and Baghdad (1 200 000 PE)*. 11th IWA Specialised Conference Design, Operation and Economics of Large Waste Water Treatment Plants. Budapest, Hungary, 4–8 September 2011.

Miasto	Wielkość oczyszczalni	Uwagi
Loujiang (Chiny)	400 000 RLM (60 000 m ³ /d)	LUCAS®
Guangzhou (Chiny)	500 000 RLM (200 000 m ³ /d)	LUCAS®
Nanjing (Chiny)	1 000 000 RLM (300 000 m ³ /d)	LUCAS®
Bagdad (Irak)	1 200 000 RLM (300 000 m ³ /d)	LUCAS®

Źródło: Opracowanie własne

5. Zastosowanie technologii SBR do oczyszczania ścieków przemysłowych

Duża popularność reaktorów porcjowych w oczyszczaniu ścieków przemysłowych sprowadza się przede wszystkim do wykorzystania ich elastyczności w odniesieniu do zmienności przepływu ścieków (obciążenia hydraulicznego). Zastosowanie systemów porcjowych doskonale umożliwia dostosowanie cyklu pracy reaktora do okresowego wytwarzania ścieków w przemysłowych instalacjach technologicznych. Dotyczy to w szczególności zakładów produkcyjnych, w których znacząca ilość ścieków odpływa podczas codziennego płukania instalacji (np. przemysł spożywczy). Zbyt duże obciążenie hydrauliczne może zostać zmniejszone także poprzez zbiornik retencyjny współpracujący z reaktorami SBR. Kolejnym aspektem przemawiającym za wykorzystaniem systemów porcjowych do oczyszczania ścieków przemysłowych jest prosta obsługa takiego układu technologicznego, jak również ich mniejsza wymagana pojemność przekładająca się z kolei na mniejsze zapotrzebowanie terenu⁴³.

Sekwencyjne reaktory porcjowe wykorzystywane są do prowadzenia biologicznego oczyszczania metodą osadu czynnego ścieków zarówno przemysłowych biologicznie rozkładalnych, jak też trudno rozkładalnych ścieków specyficznych. Źródłem tego rodzaju ścieków jest przede wszystkim sektor produkcji żywności (mleczarnie, rzeźnie, ubojnie, przetwórstwo ryb), a także przemysł garbarski, celulozowo-papierniczy, utylizacyjny itp. Systemy SBR mogą być również stosowane do oczyszczania lub podczyszczania ścieków z ferm hodowlanych (kurzych, trzody chlewnej), gorzeln, winiarni itp.⁴⁴ Potwierdzeniem zasadności stosowania systemów SBR do oczyszczania ścieków przemysłowych są instalacje techniczne w kraju i na świecie (tab. 4).

⁴³ A. Masłoń, J. A. Tomaszek, *Zastosowanie sekwencyjnych reaktorów porcjowych do oczyszczania ścieków przemysłowych*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, nr 276, z. 58, s. 215–246.

⁴⁴ A. Masłoń, J. A. Tomaszek, *Zastosowanie...*, op. cit.

Tab. 4. Wybrane oczyszczalnie ścieków przemysłowych wykorzystujące reaktory SBR

Zakład produkcyjny	Miasto	Uwagi
Przetwórstwo owoców	Białobrzegi	–
Przetwórstwo owoców	Ostrołęka	Qśrd=600 m ³ /d
Przetwórstwo owoców i warzyw	Skołyszyn	Qśrd=278 m ³ /d
Przetwórstwo owoców	Rzeszów	–
Przetwórstwo spożywcze	Żory	–
Mleczarnia	Jasienica Rosielna	–
Mleczarnia	Lidzbark Welski	Qśrd=50 m ³ /d
Mleczarnia	Gościno	Qśrd=250 m ³ /d
Mleczarnia	Lipisko	Qśrd=300 m ³ /d
Cukiernia/piekarnia	Płońsk	Qśrd=500 m ³ /d
Browar	Sierpc	–
Masarnia	Chrzanów	Qśrd=400 m ³ /d
Masarnia	Stanisławów	Qśrd=260 m ³ /d
Ubojnia drobiu	Mosina k. Poznania	–
Zakład chemiczny	Sochaczów	Qśrd=2000 m ³ /d
Browar	Rothaus, Niemcy	Qśrd=10000 m ³ /d
Browar	Kulmbach, Niemcy	–
Zakład tekstylny	Humenne, Czechy	–
Drożdżownia	Damaszek, Syria	–

Źródło: Opracowanie własne

6. Zastosowanie technologii SBR do oczyszczania wybranych strumieni ścieków

Sekwencyjne reaktory porcjowe mogą być z powodzeniem stosowane do oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów. Badania nad zastosowaniem SBR-ów w aspekcie oczyszczania bądź podczyszczania odcieków prowadzone były m.in. przez Loukidou i Zouboulis⁴⁵, Klimiuk i Kulikowską⁴⁶ oraz Neczaj i Wsp.⁴⁷ Przy odpowiednim reżimie pracy reaktora porcjowego istnieje możliwość zmniejszenia ChZT o ponad 95% i uzyskania całkowitej nityfikacji azotu amonowego. W zakresie usunięcia fosforu ogólnego z odcieków konieczne jest stosowanie dodatkowego strącania chemicznego solami żelaza. Zaletą stosowania SBR-ów do oczyszczania odcieków jest ich mała kubatura, która ułatwia ich lokalizację w bliskim sąsiedztwie składowiska. Obecnie na składowisku w Kozodrzy koło Ropczyc funkcjonuje instalacja z reaktorami porcjowymi do oczyszczania odcieków.

Sekwencyjne reaktory porcjowe mogą być wykorzystane do oczyszczania wysokiego ładunku azotu amonowego z wód osadowych w strumieniu bocznym „side-stream”. Wody osadowe generowane w wyniku zagęszczania i mechanicznego odwadniania

⁴⁵ M. X. Loukidou, A. I. Zouboulis, *Comparison of two biological treatment processes using attached-growth biomass for sanitary landfill leachate treatment*. Environ. Pollut., 2001, nr 111 (2), s. 273–81.

⁴⁶ E. Klimiuk, D. Kulikowska, *Effectiveness of Organics and Nitrogen Removal from Municipal Landfill Leachate in Single- and Two-Stage SBR Systems*. Pol. J. Environ. Stud., 2004, nr 13 (5), s. 525–532.

⁴⁷ E. Neczaj, E. Okoniewska, M. Kacprzak, *Treatment of landfill leachate by sequencing batch reactor*. Desalination, 2005, nr 185, s. 357–362.

przefermentowanych osadów charakteryzują się podwyższoną temperaturą oraz wysoką zawartością związków biogenych uwalnianych podczas procesów fermentacji (ponad 1000 mg/dm³ azotu amonowego oraz 30–100 mg/dm³ fosforu). Odcieki te kierowane są zazwyczaj bezpośrednio do ścieków surowych i wspólnie z nimi oczyszczane, powodując zakłócenia w pracy osadników i komór osadu czynnego. Wobec tego konieczne jest zmniejszenie w tych wodach koncentracji związków biogenych, zwłaszcza azotu amonowego, przed ich wprowadzeniem do ciągu głównego oczyszczalni. Dotyczy to przede wszystkim obiektów o wielkości >100 000 RLM. Sekwencyjne reaktory porcjowe z powodzeniem wpisują się w efektywną strategię oczyszczania wód osadowych w strumieniu bocznym i dlatego stosowane są w różnych układach technologicznych m.in. BABE, SHARON, DEMON i Anammox.

W ramach procesu BABE (ang. *Bio-Augmentation Batch Enhanced*) prowadzona jest tzw. bioaugmentacja bakterii nityfikacyjnych polegająca na wprowadzeniu dodatkowego, wysokoefektywnego procesu nityfikacji ze zwiększoną ilością biomasy. W procesie BABE wody osadowe poddawane są nityfikacji w strumieniu bocznym w reaktorze SBR, a wyprodukowana populacja bakterii nityfikacyjnych zasila reaktor ciągu głównego. Dodatkowo część osadu recyrkulowanego z głównej linii technologicznej jest dostarczana bezpośrednio do reaktora porcjowego w strumieniu bocznym^{48,49}. Technologia bioaugmentacji BABE była z powodzeniem testowana w pełnej skali na oczyszczalni Hertogenbosch i Garmerwolde w Groningen oraz na oczyszczalni Houtrust w Hadze⁵⁰. Rezultaty zastosowania BABE w pełnej skali wykazały, że augmentacja nityfikantów w reaktorze SBR zwiększa szybkość nityfikacji w komorach osadu czynnego w ciągu głównym oczyszczalni nawet o ok. 60%⁵¹. Zaletą technologii BABE jest równoczesny wzrost wydajności usuwania azotu w całej oczyszczalni ścieków⁵². Badania prowadzone w Hertogenbosch (342 000 RLM) wykazały obniżenie średniego stężenia azotu całkowitego z 13 mg N_{całk}/dm³ do 9 mg N_{całk}/dm³⁵³, a w Garmerwolde (300 000 RLM) spadek koncentracji azotu amonowego z 13,1 mg/dm³ do 5,2 mg/dm³⁵⁴. Zastosowanie technologii BABE w reaktorze SBR pozwala zmniejszyć objętość reaktorów oczyszczalni do 50% w porównaniu do konwencjonalnej nityfikacji. Jednocześnie stosowanie augmentacji może okazać się efektywnym sposobem utrzymującym nityfikację w sytuacjach trudnych (niskie temperatury) lub w systemach z niskim WO^{55,56}.

⁴⁸ J. A. Tomaszek, *Azot...*, op. cit.

⁴⁹ J. A. Tomaszek, A. Masłoń, *Bioaugmentacja bakterii nityfikacyjnych w procesach InNitri i BABE*, IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Postęp w Inżynierii Środowiska”, Bystre, 21–23 września 2006, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 263–271.

⁵⁰ J. A. Tomaszek, A. Masłoń, *Bioaugmentacja...*, op. cit.

⁵¹ M. C. M. van Loosdrecht, S. Salem, *Biological treatment of sludge digester liquids*. IWA Specialized Conference “Nutrient management in wastewater treatment Processes and recycle Streams”. Kraków, Poland, 19–21 September, 2005. The conference proceedings, s. 13–22.

⁵² K. Muszyński, *Reaktor BABE do unieszkodliwiania odcieków w systemach oczyszczania ścieków z osadem czynnym*, Forum Eksploatatora, 2008, nr 2, s. 57–58.

⁵³ D. H. J. G. Berends, S. Salem, H. F. van der Roest, M. C. M. van Loosdrecht, *Boosting nitrification with the BABE technology*. *Wat. Sci. Tech.*, 2005, nr 52 (4), s. 63–70.

⁵⁴ J. A. Tomaszek, *Azot...*, op. cit.

⁵⁵ J. A. Tomaszek, A. Masłoń, *Bioaugmentacja bakterii nityfikacyjnych w procesach InNitri i BABE*. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Postęp w Inżynierii Środowiska”. Bystre, 21–23 września 2006 r., Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 263–271.

⁵⁶ S. Salem, D. Berends, M. C. M. van Loosdrecht, J. J. Heijnen, *Bio-augmentation by nitrification with return sludge*. *Wat. Res.*, 2003, nr 37 (8), s. 1794–1804.

Proces SHARON (ang. *Single reactor High activity Ammonium Removal Over Nitrite*) opracowano na uniwersytecie Delft w Holandii, polega na nityfikacji bogatych w amoniak wód osadowych do azotynów, które następnie są 56e amonifikacji 56 do N_2 . W technologii SHARON zachodzą procesy skróconej nityfikacji/denitryfikacji zwanymi nitytacją i denitrytacją^{57,58}. Proces ten może być prowadzony w przepływowej komorze z zawieszonym osadem czynnym, w której równocześnie występują strefy anaerobowe i aerobowe lub w reaktorach SBR⁵⁹. Przy czym prowadzenie procesu SHARON w reaktorze porcjowym daje lepsze rezultaty niż w komorze przepływowej. Poprzez użycie trójfazowej nitytacji/denitrytacji w reaktorach SBR możliwe jest 96–98% usunięcie azotu nieorganicznego z odcieków osadów pofermentacyjnych o zawartości 1200 g NH_4^+/m^3 ⁶⁰. Zastosowanie procesu SHARON skutkuje zmniejszoną produkcją osadu (ok. 30%) oraz mniejszą emisją CO_2 o ok. 20%⁶¹. Zaletą procesu SHARON jest także względna łatwość działania⁶². Zastosowanie technologii SHARON podwyższa skuteczność usuwania azotu całkowitego z 65% do 75%. Wtedy w odpływie stężenie $N_{całk}$ jest poniżej 10 mg N/dm³⁶³. Średni koszt usuwania związków amonowych ze ścieków z wykorzystaniem procesu SHARON wynosi ok. 1,7 €/kg N, wobec 3–8 €/kg N przy zastosowaniu innych technik⁶⁴.

Kolejny proces oczyszczania wód osadowych, w którym stosowane są reaktory porcjowe, nosi nazwę DEMON. Technologia DEMON (ang. *DE-amMONnification*) polega na oczyszczaniu wysokiego ładunku azotu amonowego na drodze nitytacji i procesu Anammox – tzw. deamonifikacji w reaktorze SBR z osadem czynnym. Możliwe jest uzyskanie 90,3% nityfikacji azotu amonowego i 85,8% usunięcia azotu ogólnego z wód osadowych^{65,66,67}. Koszt usunięcia związków amonowych wód osadowych w technologii DEMON wynosi ok. 1,7 €/kg N⁶⁸.

Analiza tematu wykazuje, że oczyszczanie wód osadowych zawierających duży ładunek azotu w strumieniu bocznym w sekwencyjnych reaktorach porcjowych jest bardzo efektywnym i tanim rozwiązaniem, co potwierdzają aplikacje stosowane na

⁵⁷ R. van Kempen, J. W. Mulder, C. A. Uijterlinde, M. C. M. van Loosdrecht, *Overview: full scale experience of the SHARON® process for treatment of rejection water of digested sludge dewatering*. Wat. Sci. Tech., 2001, nr 44 (1), s. 145–152.

⁵⁸ J. A. Tomaszek, *Azot...*, op. cit.

⁵⁹ Ch. Fux, *Biological Nitrogen Elimination of Ammonium-rich Sludge Digester Liquids*. PhD Thesis, DISS.ETH NO. 15018, 2003.

⁶⁰ E. Lai, S. Senkpiel, D. Solley, J. Keller, *Nitrogen removal of high strength wastewater via nitrification-denitrification using a sequencing batch reactor*. Wat. Sci. Tech., 2004, nr 50 (10), s. 27–33.

⁶¹ R. van Kempen, C. C. R. ten Have, S. C. F. Meijer, J. W. Mulder, J. O. J. Duin, C. A. Uijterlinde, M. C. M. van Loosdrecht, *SHARON process evaluation for improved wastewater treatment plant nitrogen effluent quality*. Wat. Sci. Tech., 2005, nr 52 (4), s. 55–62.

⁶² J. Rzyńska, R. van Kempen, *SHARON® – efektywna metoda oczyszczania odcieków z odwadniania osadów przefermentowanych*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna”, 2005, nr 5, s. 32–34.

⁶³ R. van Kempen, C. C. R. ten Have, S. C. F. Meijer, J. W. Mulder, J. O. J. Duin, C. A. Uijterlinde, M. C. M. van Loosdrecht, *SHARON...*, op. cit.

⁶⁴ K. W. Szewczyk, *Biologiczne metody usuwania związków azotu ze ścieków*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

⁶⁵ B. Wett, *Development and implementation of a robust deammonification process*. Wat. Sci. Tech., 2007, nr 56 (7), s. 81–88.

⁶⁶ B. Wett, *Key parameters for control of DEMON deammonification process*. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC, 2009.

⁶⁷ B. Wett, G. Nyhuis, I. Takács, S. Murthy, *Development of enhanced deammonification selector*. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2010.

⁶⁸ N. Jardin, J. Hennerkes, *Full-scale experience with the deammonification process to treat high strength sludge water – a case study*. Wat. Sci. Tech., 2012, nr 65 (3), s. 447–455.

całym świecie (tab. 5). W Polsce obecnie problem wód osadowych jest marginalizowany. Niemniej jednak w najbliższym czasie zagadnienie wód osadowych stanie się problemem zauważanym i koniecznym do rozwiązania w polskich oczyszczalniach ścieków, ponieważ większość z nich nie jest przygotowana na sprostanie coraz bardziej rygorystycznym wymaganiom dla ścieków oczyszczonych^{69, 70}. Wobec tego wydaje się być zasadne rozważenie wydzielonego oczyszczania wód osadowych, w szczególności dla dużych oczyszczalni, np. w Warszawie, Krakowie, Gdańsku i Poznaniu. Pomocne w rozwiązaniu tego problemu stają się sekwencyjne reaktory porcjowe.

Tab. 5. Oczyszczalnie ścieków z systemami oczyszczania wód osadowych z SBR-ami

Miasto	Proces	Ładunek [kg N/d]	Rok powstania
Hertogenbosch (Holandia)	BABE	-	-
Garmerwolde (Holandia)	BABE	900	2005
Walcheren (Holandia)	BABE	-	-
Utrecht (Holandia)	SHARON	900	1997
Rotterdam Dokhaven (Holandia)	SHARON	850	1999
Zwolle (Holandia)	SHARON	410	2003
Beverwijk (Holandia)	SHARON	1200	2003
Haga (Holandia)	SHARON	1300	2005
Groningen (Holandia)	SHARON	2400	2005
Nowy Jork – Wards Island (USA)	SHARON	5770	2009
Whitlingham (Wlk. Brytania)	SHARON	1500	2009
Genewa – Aire 2 (Szwajcaria)	SHARON	1900	2010
Paryż – Seine Grésillons (Francja)	SHARON	3500	2010
Strass (Austria)	DEMON	600	2004
Glarnerland (Szwajcaria)	DEMON	250	2007
Thun (Szwajcaria)	DEMON	400	2008
Heidelberg (Niemcy)	DEMON	600	2008
Etappi Oy (Finlandia)	DEMON	1000	2009
Apeldoorn (Holandia)	DEMON	1900	2009
Limmattal (Szwajcaria)	DEMON	250	2010
Zalaegerszeg (Węgry)	DEMON	160	2010
Waszyngton – Blue Pains (USA)	DEMON	-	2010
Alltech (Serbia)	DEMON	2400	2011
Tobl (Włochy)	DEMON	-	2011

Źródło: Opracowanie własne

⁶⁹ J. Rzyzińska, R. van Kempen, *SHARON...*, op. cit.

⁷⁰ J. Rzyzińska, *Wydzielone usuwanie azotu z wód osadowych*, Forum Eksploatatora, 2006, nr 4, s. 32–35.

7. Podsumowanie

„Czysta woda po jednym cyklu...” tak brzmi jedno z haseł reklamowych pewnego producenta oczyszczalni ścieków pracujących w oparciu o reaktory SBR. Przydatność sekwencyjnych reaktorów porcjowych do oczyszczania ścieków wynika z ich specyficznej charakterystyki oraz sprowadza się do wykorzystania wysokiej efektywności usuwania zanieczyszczeń ze ścieków, prostej obsługi, elastycznej pracy oraz małej powierzchni zabudowy. Najważniejszą jednak cechą przemawiającą za stosowaniem technologii SBR w oczyszczalniach ścieków jest przede wszystkim cykliczność pracy reaktora. Możliwość szybkiego dostosowania reżimu pracy reaktora porcjowego do warunków rzeczywistych poprzez szybką i płynną regulację cyklu czyni z technologii SBR rozwiązanie niezwykle konkurencyjne w odniesieniu do innych systemów oczyszczania ścieków.

Uniwersalność stosowania reaktorów porcjowych pozwala na ich wykorzystanie w każdych warunkach. Wobec tego możliwe jest zastosowanie technologii SBR w przydomowych, jak również zbiorczych systemach oczyszczania ścieków komunalnych. W Polsce oczyszczalnie porcjowego działania stosowane są przede wszystkim w przypadku małych i średnich przepustowości, z kolei na świecie funkcjonują obiekty o wielkości > 1 000 000 RLM. Reaktory porcjowe są z powodzeniem wykorzystywane również do oczyszczania ścieków przemysłowych, odcieków ze składowisk odpadów oraz wód osadowych generowanych podczas przeróbki osadów ściekowych.

Analiza tematu oraz ocena pracy wybranych oczyszczalni ścieków porcjowego działania na Podkarpaciu w pełni potwierdza przydatność technologii SBR do oczyszczania ścieków.

Bibliografia

1. Artan N., Orhon D., *Mechanism and Design of Sequencing Batch Reactors for Nutrient Removal. Scientific and Technical*. London: IWA Publishing, 2005.
2. Banaś J., Styka W., *Zastosowanie oczyszczalni ścieków SBR do ochrony zbiorników wodnych na przykładzie zbiornika czorsztyńskiego*. VII Seminarium Naukowe „Ochrona jakości i zasobów wód”, Zakopane, 2–4 października 1996.
3. Banaś J., Styka W., *Wysokoeffektywne usuwanie związków biogenych w małych oczyszczalniach ścieków w Polsce południowej* [w:] Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Usuwanie związków biogenych ze ścieków”. Kraków, 16–18 czerwca 1997.
4. Berends D. H. J. G., Salem S., Van der Roest H. F., Van Loosdrecht M. C. M., *Boosting nitrification with the BABE technology*. Wat. Sci. Tech., 2005, nr 52 (4).
5. Bugajski P., Ślizowski R., *Ocena działania oczyszczalni ścieków typu SBR w Sterkowcu-Zajazie*, Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, nr 2 (2), 2006.
6. Danesh S., Sears J. L., Barnard J., Oleszkiewicz J. A., *Biologiczne usuwanie związków biogenych w cyklicznych systemach SBR* [w:] Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej pt. „Usuwanie związków biogenych ze ścieków”. Kraków, 16–18 czerwca 1997.
7. Fux Ch., *Biological Nitrogen Elimination of Ammonium-rich Sludge Digester Liquids*. PhD Thesis, DISS.ETH NO. 15018, 2003.
8. Heidrich Z., *Kierunki rozwiązań systemów kanalizacyjnych na terenach wiejskich*, „Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska”, nr 2 (32), 2005.

9. Heidrich Z., *Przepływowe czy sekwencyjne (SBR) reaktory biologiczne z osadem czynnym*. Seminarium nt.: „Technologia oczyszczania ścieków w reaktorach SBR – teoria i praktyka”, Wydawnictwo Seidel-Przywecki. Warszawa 2007.
10. Heidrich Z., Witowski A., *Urządzenia do oczyszczania ścieków*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.
11. Jardin N., Hennerkes J., *Full-scale experience with the deammonification process to treat high strength sludge water – a case study*. Wat. Sci. Tech., 2012, nr 65 (3).
12. Kayser R., *Komentarz ATV-DVWK do A131P i do M210P. Wymiarowanie jednostopniowych oczyszczalni ścieków z osadem czynnym oraz sekwencyjnych reaktorów porcjowych SBR*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2001.
13. Kida M., Masłoń A., Tomaszek J. A., *Ocena funkcjonowania oczyszczalni ścieków w Radgoszcy*, XXXII Międzynarodowe Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA 2012 nt.: „Problemy Inżynierii Środowiska”, Płock, 31 maja – 1 czerwca 2012.
14. Klimiuk E., Łebkowska M., *Biotechnologia w ochronie środowiska*, PWN, Warszawa 2003.
15. Klimiuk E., Kulikowska D., *Effectiveness of Organics and Nitrogen Removal from Municipal Landfill Leachate in Single- and Two-Stage SBR Systems*. Pol. J. Environ. Stud., 2004, nr 13 (5).
16. Koszelnik P., Masłoń A., *Ochrona wód i gospodarka ściekowa w jednostkach osadniczych poniżej 2000 RLM (2)*, „Aura”, 2012, nr 5.
17. Lai E., Senkpiel S., Solley D., Keller J., *Nitrogen removal of high strength wastewater via nitrification-denitrification using a sequencing batch reactor*. Wat. Sci. Tech., 2004, nr 50 (10).
18. Loukidou M. X., Zouboulis A. I., *Comparison of two biological treatment processes using attached-growth biomass for sanitary landfill leachate treatment*. Environ. Pollut., 2001, nr 111 (2).
19. Mańczak M., *Zalety i wady reaktorów okresowego działania – SBR*, Seminarium nt.: „Technologia oczyszczania ścieków w reaktorach SBR – teoria i praktyka”, Wyd. Seidel-Przywecki. Warszawa 2007.
20. Masłoń A., *Ocena efektywności wybranych oczyszczalni ścieków typu SBR w Polsce południowo-wschodniej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, nr 276, z. 58, Rzeszów 2011.
21. Masłoń A., *Zastosowanie oczyszczalni ścieków SBR w aspekcie poprawy gospodarki ściekowej w regionach turystycznych* [w:] Rak J. R. (red), *Woda i surowce odnawialne a ich oddziaływanie na środowisko naturalne*, Wydawnictwo Muzeum Regionalnego im. A. Fastnachta, Brzozów 2011.
22. Masłoń A., Tomaszek J. A., *Innowacyjne rozwiązania sekwencyjnych reaktorów porcjowych stosowane w oczyszczaniu ścieków*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska”, tom 11, nr 4, 2008.
23. Masłoń A., Tomaszek J. A., *Przegląd literatury nowych rozwiązań technologicznych reaktorów sekwencyjnych z błoną biologiczną*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, nr 268, z. 56, Rzeszów.
24. Masłoń A., Tomaszek J. A., *Zastosowanie sekwencyjnych reaktorów porcjowych do oczyszczania ścieków przemysłowych*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, nr 276, z. 58, Rzeszów 2011.
25. Miernik W., *Skuteczność oczyszczania ścieków wiejskich w oczyszczalni z reaktorem o działaniu sekwencyjnym*, „Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich”, nr 2, 2007.
26. Muszyński K., *Reaktor BABE do unieszkodliwiania odcieków w systemach oczyszczania ścieków z osadem czynnym*, Forum Eksploatatora, nr 2, 2008.
27. Neczaj E., Okoniewska E., Kacprzak M., *Treatment of landfill leachate by sequencing batch reactor*, Desalination, 2005, nr 185.

28. Philips N., Tserashchuk M., Verrecht B., Wyffels S., Gerards R., Vriens L., *Design of Large Municipal Waste Water Treatment Plants using latest SBR technology: case studies Macau – China (500 000 PE) and Baghdad (1 200 000 PE)*, 11 th IWA Specialised Conference Design, Operation and Economics of Large Waste Water Treatment Plants. Budapest, Hungary, 4–8 September 2011.
29. Podedworna J., *Przegląd i ocena stanu badań nad oczyszczaniem ścieków w sekwencyjnych reaktorach porcjowych*, Inż. i Ochr. Środ., tom 7, nr 2, 2004.
30. Ryzińska J., Van Kempen R., *SHARON® – efektywna metoda oczyszczania odcieków z odwadniania osadów przefermentowanych*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna”, nr 5, 2005.
31. Ryzińska J., *Wydzielone usuwanie azotu z wód osadowych*, Forum Eksploatatora, nr 4, 2006.
32. Salem S., Berends D., Van Loosdrecht M. C. M., Heijnen J., *Bio-augmentation by nitrification with return sludge*. Wat. Res., 2003, nr 37 (8).
33. Salem S., Berends D. H. J. G., Van der Roest H. F., Van Loosdrecht M. C. M., *Full-scale application of the BABE® technology*. Wat. Sci. Tech., 2004, nr 50 (7).
34. Siwiec T., *Analiza pracy małych oczyszczalni ścieków na przykładzie wybranych oczyszczalni typu SBR*, „Przegląd Komunalny”, nr 7 (154), 2004.
35. Styka W., Banaś J., *Rozwój technologii SBR w ostatnim 20-leciu [w:] I Kongres Inżynierii Środowiska. Referaty problemowe*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 2002.
36. Styka W., *Oczyszczalnie ścieków typu SBR na obszarach wrażliwych na eutrofizację*, „Czasopismo Techniczne. Środowisko”, nr 100, z. 7.
37. Szewczyk K. W., *Biologiczne metody usuwania związków azotu ze ścieków*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
38. Teichgräber B., *Sekwencyjne reaktory porcjowe – Projektowanie i zastosowanie*, GWiTS, nr 12, 1998.
39. Tomaszek J. A., *Wysokoefektywne usuwanie związków C, N i P w reaktorach SBR województwa podkarpackiego*, III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Postęp w inżynierii środowiska”, Rzeszów–Polańczyk, 25–27 września 2003, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
40. Tomaszek J. A., *Azot i fosfor w środowisku i technologiach środowiskowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
41. Tomaszek J. A., Masłoń A., *Bioaugmentacja bakterii nityfikacyjnych w procesach InNiri i BABE*, IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Postęp w Inżynierii Środowiska”. Bystre, 21–23 września 2006, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
42. Van Kempen R., Mulder J. W., Uijterlinde C. A., Van Loosdrecht M. C. M., *Overview: full scale experience of the SHARON® process for treatment of rejection water of digested sludge dewatering*. Wat. Sci Tech., 2001, nr 44 (1).
43. Van Kempen R., Ten Have C. C. R., Meijer S. C. F., Mulder J. W., Duin J. O. J., Uijterlinde C. A., Van Loosdrecht M. C. M., *SHARON process evaluation for improved wastewater treatment plant nitrogen effluent quality*. Wat. Sci. Tech., 2005, nr 52 (4).
44. Van Loosdrecht M. C. M., Salem S., *Biological treatment of sludge digester liquids*. IWA Specialized Conference „Nutrient management in wastewater treatment Processes and recycle Streams”, Kraków, Poland, 19–21 September, 2005, The conference proceedings.
45. Van der Zandt E., Claessen V., Hommel B., Berends D., *First outing for the BABE process*. Water 21, 2005, nr 4.
46. Wasąg Z., *Optymalizacja procesu oczyszczania ścieków w oczyszczalni gminnej*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych”, 2008, z. 526.

47. Wett B., *Development and implementation of a robust deammonification process*. Wat. Sci. Tech., 2007, nr 56 (7).
48. Wett B., *Key parameters for control of DEMON deammonification process*. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC, 2009.
49. Wett B., Nyhuis G., Takács I., Murthy S., *Development of enhanced deammonification selector*. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2010.
50. Wilderer P. A., Irvine R. L., Goronszy M. C., *Sequencing batch reactor technology. Scientific and Technical Report No. 10*. London: IWA Publishing, 2001.