

JOLANTA BOHDZIEWICZ, ANNA ŚWIERCZYŃSKA

Inżynieria Wody i Ścieków
Politechnika Śląska w Gliwicach

DOBÓR NAJKORZYSTNIEJSZYCH WARUNKÓW PROWADZENIA BIOMEMBRANOWEGO WSPÓŁCZYSZCZANIA ODCIEKÓW ZE SKŁADOWISKA ODPADÓW KOMUNALNYCH*

Streszczenie. Badania współczyszczania odcieków ze składowiska komunalnego prowadzono w bioreaktorze membranowym wyposażonym w zanurzeniowy mikrofiltracyjny moduł kapilarny i pracującym jako sekwencyjny reaktor SBR w cyklach 12- i 24-godzinnym. Udział procentowy odcieków w mieszaninie ze ściekami syntetycznymi zmieniano w zakresie 5-40% obj. Stężenie osadu czynnego w bioreaktorze kształtowało się na poziomie $4,0 \text{ g/dm}^3$, a jego obciążenie substratowe było równe $0,1 \text{ g ChZT na } 1 \text{ g}_{\text{sm}} \cdot \text{d}$. Stopień oczyszczenia ścieków oceniano na podstawie obniżenia wartości wskaźników zanieczyszczeń organicznych, tj. ChZT, BZT₅, OWO, OW oraz stężeń substancji biogennej – azotu amonowego, azotanowego i fosforu. Wykazano, że w obu przebadanych systemach pracy bioreaktora efektywności współczyszczania odcieków były porównywalne, a udział odcieków w mieszaninie ścieków oczyszczanych nie powinien przekraczać 5% obj. Z uwagi na to, że i dla tej ilości odcieków stężenia azotu azotanowego i fosforu ogólnego przekraczały wartości normowane, poddano je procesowi doczyszczania w procesie odwróconej osmozy.

Słowa kluczowe: odcieki ze składowiska komunalnego, bioreaktor membranowy, kapilarny moduł zanurzeniowy, osad czynny, odwrócona osmoza

Wstęp

Ponieważ zarówno ilość odcieków, jak i ich skład chemiczny są zmienne w trakcie eksploatacji składowiska, a także zależne od wieku i rodzaju deponowanych odpadów,

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy nr NN523 3756 33 pt. „Wpływ pola ultradźwiękowego na poprawę efektywności oczyszczania odcieków ze składowisk komunalnych w tlenowym bioreaktorze membranowym”.

od wielu lat są prowadzone intensywne badania mające opracować efektywne technologie oczyszczania odcieków (SURMACZ-GÓRSKA 2001, SZYC 2003, KULIKOWSKA 2009).

Ocieki z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych charakteryzują się wysokim stężeniem azotu amonowego oraz niskim stężeniem związków organicznych podatnych na biologiczny rozkład. Dlatego ich oczyszczanie często wymaga stosowania układów wielostopniowych, kojarzących procesy biologiczne z fizykochemicznymi. W ostatnich latach dużą uwagę zwraca się na wykorzystanie do tego celu reaktorów SBR (DIAMADOPOULOS i IN. 1997, SURMACZ-GÓRSKA 2001, WON-YOUNG i IN. 2002, LAITINEN i IN. 2006, SZYŁAK-SZYDŁOWSKI i IN. 2007, KULIKOWSKA 2009).

Celem badań było wyznaczenie najkorzystniejszych warunków prowadzenia procesu biomembranowego współczyszczania mieszaniny odcieków pochodzących ze składowiska odpadów komunalnych ze ściekami syntetycznymi. Skojarzenie sekwencyjnego reaktora biologicznego z ciśnieniowymi technikami membranowymi wydaje się być skutecznym rozwiązaniem problemu oczyszczania tych wód odpadowych w porównaniu ze stosowanymi dotychczas metodami klasycznymi.

Material i metody

Substrat badań

Substratem badań były ocieki ze składowiska odpadów komunalnych w Tychach. Charakterystykę fizykochemiczną ścieków współczyszczanych w bioreaktorze membranowym przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka odcieków ze składowiska odpadów komunalnych oraz ścieków syntetycznych

Table 1. The characteristics of the municipal landfill leachates and the synthetic sewage

Oznaczenie	Jednostka	Ocieki	Ścieki syntetyczne	Wartości dopuszczalne*
ChZT	g O ₂ na 1 m ³	3 000-5 000	800	125
BZT ₅	g O ₂ na 1 m ³	180-330	300	25
OWO	g C na 1 m ³	450-600	118,5	30
OW	g C na 1 m ³	1 000-1 580	175,7	–
Azot amonowy	g N-NH ₄ na 1 m ³	950-1 550	16	10
Azot azotanowy	g N-NO ₃ na 1 m ³	0-9	7	30
Fosfor ogólny	g P na 1 m ³	15-30	15	2
pH	–	8,0-8,5	7,5	6,5-9,0

*Według ROZPORZĄDZENIA Ministra Środowiska z dnia 28 stycznia 2009 roku zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego.

Aparatura

Układ aparaturowy składał się z bioreaktora membranowego o pojemności 15 dm³ z zainstalowanym wewnątrz mikrofiltracyjnym modulem kapilarnym; zbiornika usredniającego, zapewniającego stałe, założone wcześniej obciążenie osadu czynnego oraz zbiornika na ścieki oczyszczone. Membrany kapilarne, wykonane z polifluorku winylidenu, miały średnicę porów około 0,04 μm. Konstrukcja modułu zapewniała możliwość płukania wstecznego włókien kapilarnych.

Proces odwróconej osmozy prowadzono w systemie dead-end w aparacie typu GH-100-400 amerykańskiej firmy Osmonics, stosując stałe ciśnienie transmembranowe 2,0 MPa oraz szybkość obrotową mieszadła 200 obr/min. Zastosowano płaską membranę poliamidową (ADF) o powierzchni filtracyjnej 36,3 cm² i współczynniku retencji wodnego roztworu NaCl (1% wag.) wynoszącym 99,5%.

Metodyka badań

Bioreaktor membranowy pracował jako sekwencyjny reaktor biologiczny w cyklu 12- i 24-godzinnym. Przebieg następujących po sobie faz cyklu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Fazy cyklu podczas pracy bioreaktora membranowego
Table 2. Cycle phases of the bioreactor membrane operation

Fazy pracy bioreaktora	Cykl 12-godzinny	Cykl 24-godzinny
Napełnianie	0,5 h	0,5 h
Denitryfikacja	4 h	6 h
Nitryfikacja	6 h	16 h
Sedymentacja	0,5 h	0,5 h
Odprowadzenie ścieków oczyszczonych	0,5 h	0,5 h
Odprowadzenie osadu nadmiernego	0,5 h	0,5 h

We wstępnej fazie badań wyznaczono udział procentowy odcieków współczyszczanych ze ściekami syntetycznymi, który zmieniano w zakresie od 5% obj. do 40% obj. Proces biologiczny prowadzono przy stałym obciążeniu osadu czynnego ładunkiem zanieczyszczeń wynoszącym 0,1 gChZT/g_{sm}·d. Stężenie osadu czynnego utrzymywane było na poziomie 4 g/dm³, a stężenie tlenu w komorze napowietrzania – 4 mg O₂ na 1 dm³. Wiek osadu wynosił 20 dob. Badania prowadzono przez 15 miesięcy.

Efektywność oczyszczania odcieków w obu procesach oceniano na podstawie zmiany wartości wybranych wskaźników zanieczyszczeń charakteryzujących ścieki surowe poddawane oczyszczaniu i oczyszczone, a mianowicie: ChZT, BZT₅, OWO, OW, N-NO₃, N-NH₄, P_{og}.

Wyniki

Ocieki oczyszczane w bioreaktorze membranowym pracującym w cyklu 24-godzinnym charakteryzowały się wartością wskaźnika ChZT na poziomie 3000-3500 mg O₂ na 1 dm³, podczas gdy w cyklu 12-godzinnym ChZT wynosiło 5000 mg O₂ na 1 dm³. Wzrost udziału odcieków w mieszaninie ścieków współczyszczanych wpływał w znacznym stopniu na wartości wskaźnika ChZT oraz stężenie azotu amonowego.

W tabeli 3 zestawiono wyniki badań opisujące wpływ udziału procentowego odcieków na zmianę stężenia i stopnia usunięcia związków organicznych ze współczyszczanych ścieków w bioreaktorze membranowym w cyklu 24-godzinnym, a w tabeli 4 w cyklu 12-godzinnym.

Tabela 3. Zależność stopnia usunięcia związków organicznych od udziału procentowego odcieków w mieszaninie ścieków współczyszczanych podczas pracy bioreaktora w cyklu 24-godzinnym
Table 3. The dependence of the degree of removal of organic compounds on the leachates share in the mixture during bioreactor operation in a 24-hour cycle

Udział odcieków (% obj.)	Ścieki oczyszczone							
	ChZT (mg/dm ³)	r* (%)	BZT ₅ (mg/dm ³)	r* (%)	OWO (mg/dm ³)	r* (%)	OW (mg/dm ³)	r* (%)
0	35	96,1	2	99,3	19,9	90,0	49	81,2
5	69	91	2	99,3	22,98	78,5	51,29	75,3
10	93	91,5	2	99,3	39,05	77,1	90,27	74,4
20	131	87,5	5	98,3	74,48	63,6	138,71	73,95
30	186	84,5	20	92,8	105,34	56,7	175,64	105,34
40	300	78,5	20	92,8	123,75	58,4	197,87	78,6

*r – stopień obniżenia wartości wskaźnika zanieczyszczeń.

Badania wykazały wzrost zawartości związków organicznych w odpływie z bioreaktora w warunkach rosnącego udziału odcieków w ściekach współczyszczanych. Zaobserwowano bardzo zbliżone stopnie obniżenia ładunku zanieczyszczeń organicznych w ściekach oczyszczonych w obu systemach pracy bioreaktora. Zarówno w cyklu 12-, jak i 24-godzinnym najkorzystniejsze efekty oczyszczania uzyskano dla 5% obj. udziału odcieków. Większy ich udział skutkował większymi wartościami ChZT i OWO ścieków oszyszczonych, które uniemożliwiały bezpośrednie odprowadzenie ich do odbiornika naturalnego. Jedynie wartości BZT₅ dla udziału odcieków do 30% obj. spełniały wymagane normy i kształtowały się na poziomie nieprzekraczającym 20 mg/dm³.

W tabeli 5 zestawiono wyniki badań opisujące wpływ udziału procentowego odcieków na zmiany stężenia i stopnia usunięcia związków biogenych w pracy bioreaktora membranowego w cyklu 24-godzinnym, w tabeli 6 zaś w cyklu 12-godzinnym.

Bohdziewicz J., Świerczyńska A., 2011. Dobór najkorzystniejszych warunków prowadzenia biomembranowego współczyszczania odcieków ze składowiska odpadów komunalnych. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 4, #34.

Tabela 4. Zależność stopnia usunięcia związków organicznych od udziału procentowego odcieków w mieszaninie ścieków współczyszczanych podczas pracy bioreaktora w cyklu 12-godzinnym
Table 4. The dependence of the degree of removal of organic compounds on the leachates share in the mixture during bioreactor operation in a 12-hour cycle

Udział odcieków (% obj.)	Ścieki oczyszczone							
	ChZT (mg/dm ³)	r* (%)	BZT ₅ (mg/dm ³)	r* (%)	OWO (mg/dm ³)	r* (%)	OW (mg/dm ³)	r* (%)
0	35	96,1	2	99,3	19,9	90,0	49	81,2
5	65	92,7	2	99,4	24,8	88,7	54	84,6
10	150	88,0	5	98,4	42,5	81,9	70,5	82,2
20	390	74	20	93,4	83,6	67,7	96,7	82,9
30	410	77,2	20	93,4	115,6	61,4	119	85,4
40	465	78,8	30	90,9	–	–	–	–

*r – stopień obniżenia wartości wskaźnika zanieczyszczeń.

Tabela 5. Wpływ udziału procentowego odcieków na zmiany stężenia i stopień usunięcia substancji biogenych w procesie współczyszczania odcieków ze ściekami syntetycznymi podczas pracy bioreaktora w cyklu 24-godzinnym

Table 5. The influence of the leachate percentage share on the change of concentration and on the degree of removal of biogenic substances during the leachate co-treatment with synthetic sewage in a 24-hour cycle of bioreactor operation

Udział odcieków (% obj.)	Ścieki oczyszczone				
	N-NO ₃ (mg/dm ³)	N-NH ₄ (mg/dm ³)	r* (%)	P _{og} (mg/dm ³)	r* (%)
0	30	0,5	96,9	2	86,6
5	78	1,9	98,5	3,0	80,0
10	94	2,0	98,8	5,4	64,0
20	120	2,5	99,2	6,5	56,6
30	144	6,0	98,1	11	26,6
40	175	7,5	98,8	15	–

*r – stopień obniżenia wartości wskaźnika zanieczyszczeń.

Widać wyraźnie, że wydłużenie czasu kontaktu (cykl 24-godzinnny) biomasy ze ściekami nie wpłynęło na stopień usunięcia związków biogenych ze współczyszczanych ścieków. Stopień obniżenia stężenia azotu amonowego dla wszystkich przebadanych udziałów objętościowych odcieków w obu systemach pracy bioreaktora był wysoki i przekroczył 98% (1,0 mg NH₄ na 1 dm³ dla 5% obj. odcieków i 8,5 mg NH₄ na 1 dm³ dla 40% obj. odcieków).

Tabela 6. Wpływ udziału procentowego odcieków na zmiany stężenia i stopień usunięcia substancji biogenych w procesie współczyszczania odcieków ze ściekami syntetycznymi podczas pracy bioreaktora w cyklu 12-godzinny

Table 6. The influence of the leachate percentage share on the change of concentration and on the degree of removal of biogenic substances during the leachate co-treatment with synthetic sewage in a 12-hour cycle of bioreactor operation

Udział odcieków (% obj.)	Ścieki oczyszczone				
	N-NO ₃ (mg/dm ³)	N-NH ₄ (mg/dm ³)	r* (%)	P _{og} (mg/dm ³)	r* (%)
0	30	0,5	96,9	2	86,7
5	52	1,0	98,1	4,1	76,2
10	106	1,0	99,1	6,7	64,7
20	122	3,8	98,3	17	19,0
30	206	6,0	98,2	20	20,0
40	292	8,5	98,5	20	20,0

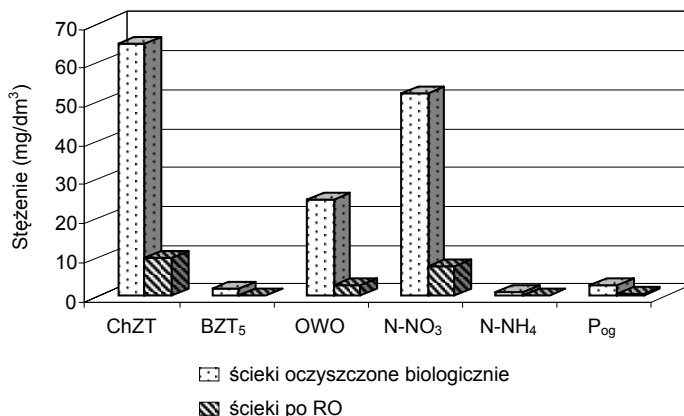
*r – stopień obniżenia wartości wskaźnika zanieczyszczeń.

Wzrost stężenia odcieków w ściekach syntetycznych wpłynął na obniżenie efektywności usuwania fosforu ogólnego. Najwyższy stopień jego usunięcia odnotowano dla 5% obj. udziału odcieków w mieszaninie ścieków oczyszczanych. Stężenie tego biogenu w ściekach oczyszczonych w trakcie pracy bioreaktora w cyklu 24-godzinny wynosiło 3 mg P na 1 dm³, podczas gdy w cyklu 12-godzinny uzyskano niewiele większą wartość, kształtującą się na poziomie 4,1 mg P na 1 dm³.

Wykazano, że ze wzrostem udziału odcieków rosło również stężenie azotanów w odpływie z reaktora pracującego zarówno w cyklu 24-godzinny, jak i 12-godzinny. Stężenie N-NO₃ w pierwszym cyklu zmieniało się w zakresie od 78 mg/dm³ (5% obj.) do 175 mg/dm³ (40% obj.), a w drugim od 52 mg/dm³ (5% obj.) do 292 mg/dm³ (40% obj.).

Biorąc pod uwagę to, że stężenia azotu azotanowego i fosforu w ściekach oczyszczonych dla wyznaczonego w badaniach najkorzystniejszego udziału odcieków przekraczały wartości dopuszczalne dla obu stosowanych systemów pracy bioreaktora, za optymalny można uznać cykl 12-godzinny. Stwarza to możliwości współczyszczania większej ilości odcieków w tym samym czasie.

Ze względu na przekroczenie normowanych wartości stężeń związków biogenych postanowiono doczyścić ścieki w procesie odwróconej osmozy. Zastosowano wysokociśnieniowy proces membranowy i otrzymano zadowalające efekty (rys. 1). Stężenia zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych kształtowały się na poziomie: ChZT 10 mg/dm³, BZT₅ 0 mg/dm³, OWO 3 mg/dm³, azot azotanowy 7,5 mg/dm³, azot amonowy 0 mg/dm³, a fosfor ogólny poniżej 1,0 mg/dm³.



Rys. 1. Efektywność oczyszczania badanych ścieków w procesie odwróconej osmozy

Fig. 1. Effectiveness of additional treatment of sewage by reverse osmosis

Dyskusja

W badaniach odnotowano wyraźny wzrost stężenia azotu azotanowego w odpływie z bioreaktora, który w głównej mierze był wywołany wysoką zawartością azotu amonowego w ściekach współoczyszczanych. Stężenie tego biogenu kształtowało się na poziomie 15 mg/dm^3 , podczas gdy po dodaniu 5% obj. odcieków jego wartość wzrosła średnio do 100 mg/dm^3 . Potwierdzają to wyniki badań innych naukowców (DIAMADOPOULOS i IN. 1997, KULIKOWSKA 2009, SZYC 2003, SZYŁAK-SZYDŁOWSKI i IN. 2007). Ze względu na zbyt wysokie stężenia azotu azotanowego w ściekach oczyszczonych, przekraczające wartości normatywne, w dalszych badaniach planuje się przeprowadzenie próby wyznaczenia korzystniejszych czasów poszczególnych faz cyklu procesu biologicznego.

Biologiczne metody oczyszczania odcieków ze starych składowisk odpadów komunalnych nie są dość skuteczne w usuwaniu zawartych w nich trudnobiodegradalnych zanieczyszczeń. Dlatego też często najefektywniejszym sposobem oczyszczania tego typu ścieków przemysłowych jest kojarzenie metod biologicznych z fizykochemicznymi. W przedmiotowych badaniach osiągnięto dużą efektywność współoczyszczania odcieków w układzie zintegrowanym, łączącym proces biologiczny, tj. metodę osadu czynnego, z mikrofiltracją i odwróconą osmozą. Oczyszczone w nim ścieki będą mogły być odprowadzone do kanalizacji lub odbiornika naturalnego.

Wnioski

1. Wykazano, że udział procentowy odcieków współczyszczanych ze ściekami syntetycznymi w bioreaktorze membranowym nie powinien przekraczać 5% obj. zarówno w cyklu 12-, jak i 24-godzinny.

2. Za korzystniejszy uznano 12-godzinny cykl pracy bioreaktora.

3. Stopień usunięcia azotu amonowego w porównaniu z innymi związkami biogenymi był największy i przekroczył 98% dla wszystkich przebadanych udziałów procentowych odcieków. Wzrost ilości odcieków współczyszczanych ze ściekami syntetycznymi nie wpłynął na efektywność usuwania azotu amonowego.

4. Wraz ze wzrostem udziału odcieków rosło stężenie azotu azotanowego w odpływie z bioreaktora. Dla najkorzystniejszego, 5% obj. udziału odcieków stężenie N-NO_3^- przekroczyło wartość normowaną i kształtowało się na poziomie $52 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ na } 1 \text{ dm}^3$.

5. Doczyszczanie odcieków po ich biologicznym współczyszczaniu w procesie odwróconej osmozy umożliwiło ich bezpośrednie odprowadzenie do odbiornika naturalnego lub kanalizacji.

Literatura

- DIAMADOPOULOS E., SAMARAS P., DABOU X., SAKELLAROPOULOS G.P., 1997. Combined treatment of landfill leachate and domestic sewage in a sequencing batch reactor. *Water Sci. Technol.* 36, 2-3: 61-68.
- LAITINEN N., LUONSI A., VILEN J., 2006. Landfill leachate treatment with sequencing batch reactor and membrane bioreactor. *Desalination* 191: 86-91.
- KULIKOWSKA D., 2009. Charakterystyka oraz metody usuwania zanieczyszczeń organicznych z odcieków pochodzących z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych. *Ecol. Chem. Eng.* 16, 3: 389-402.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 28 stycznia 2009 roku zmieniające Rozporządzenie w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. 2005. Dz. U. Nr 239, poz. 2019, z późn. zm.
- SURMACZ-GÓRSKA J., 2001. Degradacja związków organicznych zawartych w ociekach z wysypisk. Monogr. Kom. Inż. Środ. PAN 5.
- SZYC J., 2003. Ocieki ze składowiska odpadów komunalnych. Wyd. Nauk. Gabriel Borowski, Warszawa.
- SZYŁAK-SZYDŁOWSKI M., GRABIŃSKA-ŁONIEWSKA A., REYNAERTS M., SKRZYPIEC M., 2007. Wpływ obciążenia osadu czynnego na efektywność podczyszczania odcieków w reaktorze SBR. W: VIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa, Politechnika Warszawska: 611-622.
- WON-YOUNG A., MOON-SUN K., SEONG-KEUN Y., KWANG-HO CH., 2002. Advanced landfill leachate treatment using an integrated membrane process. *Desalination* 149, 1-3: 109-114.

THE OPTIMISATION OF BIOMEMBRANE REACTOR WORKING CONDITIONS FOR CO-TREATMENT OF MUNICIPAL LANDFILL LEACHATE

Summary. The experiments of the co-treatment of municipal landfill leachates were performed in a membrane bioreactor with an internal microfiltration capillary module. The membrane bioreactor acted as the SBR with a 12-hour cycle and a 24-hour cycle. The share amount of leachate in the treated mixture was changed over a range of 5%-40% vol. The concentration of the activated sludge in the membrane bioreactor was equal to 4.0 g/dm^3 and the sludge loading with contaminants reached the level of $0.1 \text{ gCOD/g}_{\text{TSD}}$. The effectiveness of the process was estimated basing on the change in values of the following parameters: COD, BOD₅, TOC, N_{tot}, N-NO₃, N-NH₄ and P_{tot}. It was shown, that in both investigated systems of the bioreactor operation the effectiveness of leachate co-treatments was comparable and the share of leachate in the mixture should not exceed 5 vol.%. However, even for the optimal share of leachate concentrations of nitrate, nitrogen and phosphorus exceeded permissible values, so the bioreactor effluent was polished via reverse osmosis.

Key words: landfill leachate, membrane bioreactor, activated sludge, reverse osmosis, immersed capillary membrane module

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Anna Świerczyńska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Akademicka 2 a, 40-875 Gliwice, Poland, e-mail: anna.swierczynska@polsl.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

11.05.2011

Do cytowania – For citation:

*Bohdziewicz J., Świerczyńska A., 2011. Dobór najkorzystniejszych warunków prowadzenia biomembranowego współczyszczania odcieków ze składowiska odpadów komunalnych. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 4, #34.*