



Efektywność oczyszczania ścieków przy zastosowaniu reaktora membranowego

Krystyna Konieczny
Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wstęp

Wprowadzanie coraz bardziej restrykcyjnych wymagań dotyczących jakości ścieków oczyszczonych odprowadzanych do wód wymusza stosowanie nowych rozwiązań technologicznych w celu uzyskania lepszej efektywności oczyszczania ścieków, niż w układach konwencjonalnych.

W ostatnich latach nastąpił spadek kosztów inwestycyjnych membran, co zaowocowało wzrostem liczby sprzedawanych urządzeń [5]. Technologie membranowe spośród wielu zastosowań są wykorzystywane między innymi do oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych oraz uzdatniania wód [1, 5, 9]. Uważa się, że są to najlepsze z dostępnych metod (BAT – Best Available Technology). Na wybór metody separacji wpływają przede wszystkim realność technicznego wykonania oraz jak to zwykle bywa aspekty ekonomiczne. Procesy membranowe mogą być wykorzystane na trzy sposoby: do oczyszczania (usuwanie zanieczyszczeń z rozpuszczalnika), do zateżniania (usunięcie rozpuszczalnika z roztworu), do frakcjonowania (rozdzielenie roztworu na składniki). Transport cząsteczek zostaje wywołany różnicą potencjału chemicznego po obu stronach membrany, a separacja masy zachodzi dzięki różnicy w szybkości transportu substancji (składników roztworów lub mieszanin) [2]. W zależności od wielkości porów membrany (zakres 5 rzędów wielkości, od 10 μm do 0,0001 μm) wyróżniamy procesy: mikro-, ultra-, nanofiltrację i odwróconą osmozę. Taka rozbieżność w wielkościach zatrzymywanych cząsteczek wymaga zastosowania membran o różnej strukturze oraz ciśnienia transmembranowego o coraz to więk-

szych wartościach. Wraz ze zmniejszaniem się wielkości porów membrany, wzrasta opór hydrauliczny dla strumienia zasilającego dla poszczególnych procesów. Technika ultrafiltracji (UF) daje możliwość separowania cząsteczek o masie molowej większej niż 500 Da, czyli o rozmiarach w przedziale 2–20 nm. UF posiada szerokie zastosowanie przede wszystkim w oczyszczaniu wód i ścieków, stanowiąc rozwiązanie alternatywne dla metod konwencjonalnych [2].

Wykorzystanie UF jest jednak ograniczone tzw. foulingiem. Jest to proces odkładania się substancji na powierzchni i/lub w porach, przez co wydajność hydrauliczna membrany spada. Jeżeli układ membranowy pracuje przy stałej wydajności permeatu, wówczas następuje wzrost ciśnienia. Jeśli z kolei instalacja pracuje przy stałym ciśnieniu, skutkuje to spadkiem wydajności pracy układu. Fouling jest zjawiskiem charakterystycznym dla wszystkich ciśnieniowych technik membranowych, ale przede wszystkim dla technik wykorzystujących membrany porowate (MF,UF). Zjawisko foulingu może mieć charakter zarówno odwracalny jak i nieodwracalny. Odwracalny jest wtedy, kiedy istnieje możliwość przywrócenia pierwotnej wydajności membrany poprzez całkowite usunięcie osadu. Czasem jednak mimo podjęcia działań czyszczenia mechanicznego, a nawet chemicznego nie da się przywrócić początkowej wydajności membrany. Wówczas mamy do czynienia z foulingiem nieodwracalnym [2]. Sposobem na zmniejszenie zjawiska foulingu jest przeprowadzanie płukania wstecznego (ang. backflushing) o częstotliwości wg zapotrzebowania. Proces polega na przepływie permeatu w przeciwnym kierunku niż w trakcie normalnej pracy instalacji. Nowszą metodą jest tak zwane płukanie z użyciem powietrza (ang. airflushing) lub płukanie typu powietrze/woda [1, 2].

Technologia z wykorzystaniem reaktorów membranowych jest rozwinięciem i unowocześnieniem metody osadu czynnego. Podstawową różnicą jest zastąpienie osadników wtórnych, występujących w klasycznej metodzie osadu czynnego, systemem mikroporowych (najczęściej mikro- lub ultrafiltracyjnych) membran filtracyjnych umieszczonych bezpośrednio w napowietrzanej komorze osadu czynnego lub jako urządzenie wydzielone w osobnym zbiorniku.

Połączenie ciśnieniowych technik membranowych (UF lub MF) z metodą biologicznego oczyszczania (np. metoda osadu czynnego, złoża biologicznego lub zaimmobilizowanych enzymów) potocznie nosi nazwę

bioreaktorów membranowych (MBR). Występują dwie zasadnicze konfiguracje MBR; moduł membranowy może być zanurzony w reaktorze biologicznym, wówczas stanowi jedną całość. Mogą również stanowić odrębne urządzenia. Różnica polega na tym, że w pierwszym przypadku gdy membrana zespolona jest z reaktorem – wypływa tylko permeat, ponieważ osad czynny pozostaje w reaktorze. Natomiast, kiedy moduł membranowy jest oddzielony od reaktora, wówczas powstaje również retentat, który zawracany jest do reaktora [14]. Główną rolą modułu membranowego jest separacja osadu czynnego od oczyszczonych ścieków, który spełnia więc funkcję klasycznego osadnika wtórnego. Poza tym membrana poprzez nagromadzenie się na jej powierzchni warstwy osadu czynnego przyczynia się do usuwania zanieczyszczeń (spadek ChZT, BZT₅, część soli biogenych). Z powodu zatrzymywania przez membranę związków wielkocząsteczkowych i dłuższego czasu przebywania osadu czynnego w reaktorze, następuje także możliwość usuwania mikrozanieczyszczeń trudno biodegradowalnych jak: pestycydy, substancje hormonalne czy farmaceutyki. Bowiem długi wiek osadu w reaktorze sprzyja rozwojowi specyficznych wolno namnażających się bakterii zdolnych do usuwania tych związków [15].

Biologiczne reaktory membranowe (MBR) posiadają wiele zalet w porównaniu z konwencjonalnymi reaktorami osadu czynnego, z których najważniejsze to: bardzo wysoka efektywność separacji faz i jakość (mikrobiologiczna i fizykochemiczna) ścieków oczyszczonych oraz możliwość usuwania specyficznych mikrozanieczyszczeń (np. farmaceutyki), mniejsza objętość reaktora z uwagi na stosowane wyższe stężenie osadu a także mniejsza ilość produkowanego osadu nadmiernego [1, 4, 5, 8, 9]. Obecnie w instalacjach membranowych stosuje się stężenie osadu czynnego przeciętnie od 10–15 g s.m/l, a czas przetrzymywania ścieków od 10–20 dni. Takie parametry są optymalne dla pracy membrany. Zjawisko blokowania membran jest wtedy mniejsze, a tym samym spadają koszty związane z czyszczeniem membrany [14]. Występują również reaktory w których stężenie osadu jest dużo wyższe, nawet do 50 g s.m/l [6] a wiek osadu mieści się w przedziale od 25 do 3500 dni [15].

W literaturze przedmiotu występuje dużo danych dotyczących efektywności oczyszczania ścieków w reaktorach membranowych o różnej przepustowości [4, 5, 8, 9]. Brak jest jednak danych dotyczących eksploatacji krajowych oczyszczalni z reaktorami membranowymi.

Z informacji uzyskanych od eksploatorów kilku komunalnych oczyszczalni wynika, iż nie zawsze pracują one prawidłowo. Problemy pojawiające się w eksploatacji tego typu obiektów wymagają dogłębnej analizy. Konieczne jest więc zebranie większej liczby danych eksploacyjnych i przeanalizowanie działających w kraju małych i średnich oczyszczalni ścieków z reaktorami membranowymi w celu ich porównania z „oczyszczalniami klasycznymi” pod względem technologicznym, energetycznym i eksploacyjnym.

2. Obiekt badań

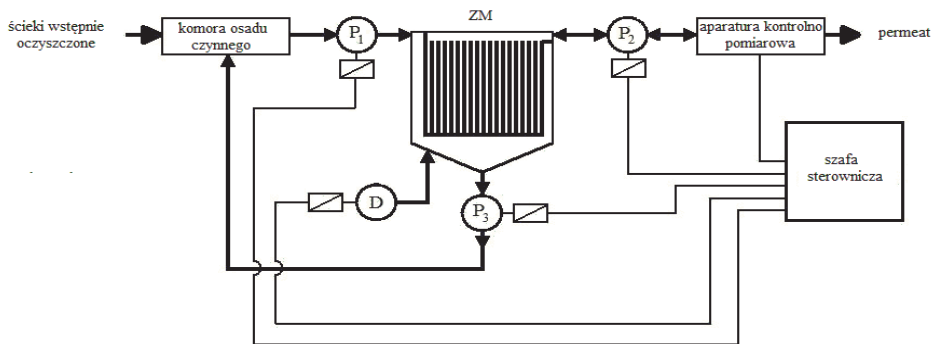
Badania przeprowadzono na dwóch oczyszczalniach ścieków w Polsce nr 1 (COŚ) oraz nr 2 (ZOŚ). Wykorzystywana technologia oczyszczania ścieków w COŚ (nr 1) oparta jest na procesach mechanicznych i biologicznych z możliwością chemicznego wspomaganie w zakresie usuwania fosforu. Przyjęta technologia zapewnia spełnienie zarówno norm polskich jak i warunków ujętych w Dyrektywie Rady Wspólnot Europejskich Nr 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991. COŚ została zaprojektowana na przepustowość 51 tys. m³/d, przy czym obecnie przyjmuje ok. 34 tys. m³/d. Oczyszczalnia jest zautomatyzowana, z możliwością sterowania urządzeniami zarówno zdalnie jak i na miejscu przez operatora. Oczyszczalnia jest przyjazna dla środowiska, dlatego, że część osadów w komorach fermentacyjnych ulega procesowi fermentacji, którego produktem jest biogaz wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej i ciepła, a pozostała część osadów i inne odpady wywożone są z oczyszczalni na bieżąco. Istnieje również możliwość odzysku lekkich kwasów tłuszczowych (LKT) z osadów wstępnych [3]. W COŚ okresowo została uruchomiona instalacja w skali ¼ technicznej, spełniająca rolę osadnika wtórnego, wyposażona w moduły membranowe BIO-CEL[®] firmy Microdyn Nadir.

Zbiorcza Oczyszczalnia Ścieków (ZOŚ) nr 2. została rozbudowana przez zastosowanie reaktorów MBR (Membrane Biological Reactor) w miejsce reaktorów z osadem czynnym o działaniu cyklicznym typu SBR (Sequencing Batch Reactor). Oczyszczalnia została zaprojektowana na przepustowość dobową średnią $Q_{d\text{sr}} = 484 \text{ m}^3/\text{d}$ i maksymalną $Q_{d\text{max}} = 675 \text{ m}^3/\text{d}$ oraz równoważną liczbę mieszkańców $RLM = 3800$. Została ona przewidziana do usuwania zanieczyszczeń organicznych oraz zawiesiny. Do oczyszczalni dopływają ścieki bytowe od mieszkańców oraz

ścieki dowożone przez samochody asenizacyjne. Do wstępnego mechanicznego oczyszczania zastosowano zblokowane urządzenie – sitopiasownik z napowietrzaniem. Po wstępnym mechanicznym oczyszczeniu ścieki są retencjonowane i oczyszczane biologicznie w dwóch ciągach reaktorów z zanurzonymi modułami membranowymi BIO-CEL[®] firmy Microdyn Nadir.

3. Aparatura i metodyka

Instalacja membranowa typu BIO-CEL[®] – BC 10-10 (rysunek 1 i 2) zastosowana w oczyszczalni COŚ umieszczona została przy komorze osadu czynnego [7]. Stanowisko badań składało się z siedmiu głównych elementów: zbiornika z membraną (ZM), szafy sterowniczej, pompy nadyawy (P_1), pompy permeatu (P_2), pompy osadu nadmiernego (P_3), dmuchawy (D), aparatury kontrolno pomiarowej (AKP).



Rys. 1. Schemat blokowy układu reaktor biologiczny – instalacja membranowa w COŚ

Fig. 1. The scheme of the system biological reactor – membrane installation in COŚ treatment plant

Moduł z membraną został wykonany przez niemiecką firmę Microdyn Nadir GmbH, która jest wiodącym producentem na rynku, membran i modułów do procesów mikro-, ultra- i nanofiltracji. Parametry i dane operacyjne instalacji użytej do badań w COŚ nr 1, zostały podane w tabeli 1 [7].



Rys. 2. Zdjęcie instalacji membranowej stosowanej do badań w COŚ
Fig. 2. The photo of the membrane installation used in the COŚ treatment plant

Proces oczyszczania w instalacji realizowano cyklicznie. Ścieki z komory osadu czynnego były kierowane do zbiornika z modułem membranowym gdzie następował proces filtracji membranowej, w wyniku której zachodziła separacja osadu czynnego od oczyszczonych ścieków. Jeden pełny cykl filtrowania trwał 10 minut, na który składa się kolejno: filtracja właściwa: 8,5 minuty, pauza: 0,5 minuty, płukanie wsteczne: 0,5 minuty, druga pauza: 0,5 minuty. W momencie, kiedy poziom ścieków w zbiorniku membranowym spadał do wysokości 1,7 m, następowało automatyczne zasysanie kolejnej porcji ścieków przy równoczesnej dalszej jego pracy. Ocenę skuteczności procesu oczyszczania ścieków w COŚ rozpoczynano, gdy stężenie osadu czynnego w reaktorze membranowym (RM) wzrosło do ok. 9 g/l, a następnie gdy stężenie osiągnęło wartość ok. 16 g/l, określano cechy osadu informujące o jego pracy oraz przeprowadzono oględziny mikrobiologiczne, aby zaobserwować ewentualne zmiany zachodzące w osadzie. Pracę instalacji podzielono na trzy etapy: **I etap** – wpracowanie instalacji, **II etap** – praca okresowa instalacji, **III etap** – praca w trybie online (24 h/doba).

Tabela 1. Parametry membrany i dane operacyjne instalacji COŚ
Table 1. Membrane parameters and COŚ installation operational data

Parametry	Wartość
Powierzchnia membrany, m ²	10
Wartość cut off, kDa	150
Rozmiar porów, μm	0,04
Max. przepływ powietrza, m ³ /h	6
Max. zawartość zawiesin (SS), g/l	12
Max. ciśnienie transmembranowe podczas filtracji, mbar	400
Max. ciśnienie transmembranowe podczas płukania wstecznego, mbar	150
Max. temperatura pracy, °C	40
Min. temperatura pracy, °C	5
Zakres pH	2–11
Odporność na chlor, ppmh	100

Zbiorcza Oczyszczalnia Ścieków (ZOŚ) nr 2 realizowała oczyszczanie ścieków po wstępnym mechanicznym oczyszczeniu, które były retencjonowane i oczyszczane biologicznie w dwóch ciągach reaktorów MBR z zanurzonymi modułami membranowymi BIO-CEL[®] firmy Microdyn Nadir zbudowanymi z membran płytowych UP 150 o wielkości porów 0,05 μm (150kDa) wykonanych z hydrofilowego polietylenosulfonu (PES). W każdym reaktorze zamontowano po 2 moduły BC 400 o całkowitej powierzchni filtracyjnej 1600 m² (rysunek 3). Praca modułu odbywała się cyklicznie i składała się z następujących faz: filtracji, przerwy, płukania wstecznego ściekami oczyszczonymi (permeatem), przerwy. Czasy trwania poszczególnych faz pracy podano w tabeli 2 [12]. Membrany były płukane przy maksymalnym ciśnieniu 150 mbar. Po przekroczeniu ciśnienia filtracji 400 mbar zalecane jest chemiczne czyszczenie membran podchlorynem sodu i kwasem cytrynowym.

Ścieki oczyszczone odprowadzane są do wód powierzchniowych płynących. Osad nadmierny stabilizowany tlenowo w reaktorze jest gromadzony w zbiorniku osadu nadmiernego. Schemat technologiczny oczyszczalni przedstawiono na rysunku 3 a parametry pracy podano w tabeli 3 [12].

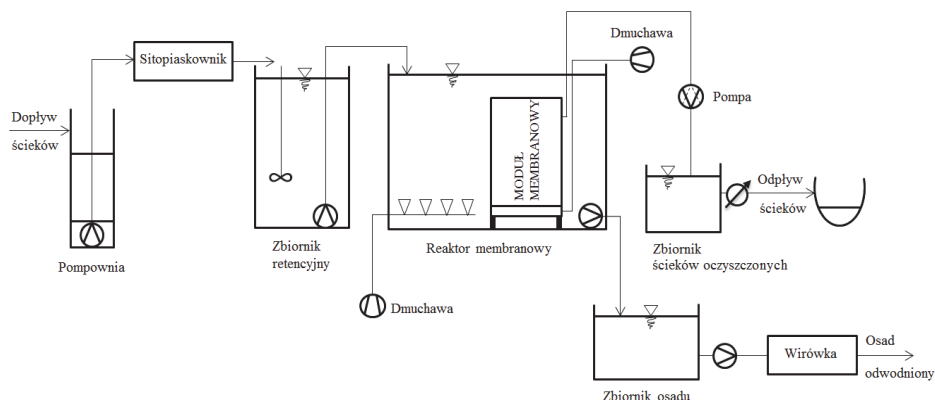
Tabela 2. Parametry pracy membran filtracyjnych w ZOŚ**Table 2.** Parameters of membrane filtration in ZOŚ treatment plant

Cykl filtracji, min	10
Czas fazy filtracji, min	8,5
Przerwa, spoczynek, min	0,5
Płukanie wsteczne, min	0,5
Przerwa, spoczynek, min	0,5
Średni przepływ ścieków, m ³ /h	24,2
Czas trwania filtracji, min/h	51
Średnia wydajność membrany, l/m ² h	15,2

Tabela 3. Zestawienie parametrów eksploatacyjnych analizowanej oczyszczalni ścieków ZOŚ**Table 3.** Process parameters of the analyzed ZOŚ sewage treatment plant

Parametr	Wartość projektowa	Wartość rzeczywista
Ilość ścieków, m ³ /d	484	250
RLM	3800	1430
Obciążenie osadu ładunkiem, g BZT ₅ /g*d	0,065	0,03
Wiek osadu, doba	25	> 40
Pojemność reaktora biologicznego – 2 ciągi	350 m ³	
Stężenie osadu, kg/m ³	10	8–10
Stężenie tlenu w komorze napowietrzania, mg O ₂ /dm ³	2,0	1,5–2,0

Jednostkowy wskaźnik zainstalowanej mocy w oczyszczalni wynosi 17,6 W/RLM i 138 W/m³/d i jest porównywalny do wskaźników oczyszczalni z osadem czynnym o działaniu cyklicznym SBR o podobnej przepustowości.



Rys. 3. Schemat blokowy układu reaktor biologiczny – instalacja membranowa w ZOS

Fig. 3. The scheme of the system biological reactor – membrane installation in ZOS treatment plant

W trakcie prowadzenia badań w oczyszczalni COŚ, regularnie rejestrowano zmiany następujących parametrów: ciśnienie filtracji permeatu, przepływ permeatu, wysokość poziomu ścieków w komorze membran, czas pracy pompy nadawy i permeatu oraz stężenie osadu czynnego. Poza tym regularnie pobierano próbki ścieków surowych, permeatu i ścieków oczyszczonych z osadnika wtórnego, w których oznaczano: indeks chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT), biochemiczne zapotrzebowanie tlenu (BZT₅), stężenie azotu ogólnego (N_{og}), stężenie fosforu ogólnego (P_{og}), zawiesinę, mętność, przewodność właściwą w 25°C. Do obliczeń skuteczności oczyszczania ścieków surowych, a więc określania stopnia stopnia usuwania w ściekach oczyszczonych, wykorzystywano wartości uśrednione z tych samych dwóch dni.

Ze względu na możliwość zakażenia ludzi przez wodę, konieczne jest przeprowadzanie analizy mikrobiologiczno-sanitarnej dla wód pitnych oraz wód oczyszczonych odprowadzanych do zbiorników powierzchniowych [10]. W trakcie badań w COŚ wykonywano analizy takie jak dla wody do picia, co miało na celu określenie czy permeat pod względem mikrobiologicznym nie stanowi zagrożenia i sprawdzenie czy spełnia wymogi zawarte w Rozporządzeniu Ministra [13]. Przeprowadzenie analizy miało również na celu określenie skuteczności filtracji

instalacji. W permeacie oznaczano zarówno obecność bakterii chorobotwórczych (*E.Coli* i Enterokoki) jak i innych bakterii, np. grupy *coli* i bakterii pozostałych.

Celem przeprowadzonych analiz w drugiej oczyszczalni ZOŚ, było określenie efektywności oczyszczania ścieków po jej modernizacji mającej na celu zwiększenie przepustowości oraz niezawodności usuwania materii organicznej oraz zawiesin. Badania prowadzono w warunkach pracującej oczyszczalni ścieków przy rzeczywistym obciążeniu hydraulicznym i obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń, które stanowiło ok. 50% obciążenia projektowego. Badania technologiczne prowadzone były w latach 2013–2014. Wykonywano pomiary ilości ścieków dopływających oraz analizowano jakość ścieków dopływających oraz ścieków oczyszczonych, odpływających z reaktora biologicznego (permeatu) [12] dla podstawowych wskaźników zanieczyszczeń (BZT₅, ChZT, zawiesina ogólna), a także dla związków biogennych (azot ogólny i fosfor ogólny).

4. Wyniki badań

4.1. Oczyszczanie ścieków w COŚ

Wyniki analiz fizykochemicznych oraz analiz mikrobiologicznych dla ścieków surowych oraz ścieków oczyszczonych przez oba porównywane układy (reaktor biologiczny RB) (reaktor membranowy RM) zostały podane dla I-go, II-go i III-ciego etapu badań w tabelach 4–9.

Jakość ścieków oczyszczonych opuszczających RM zależy zarówno od pracy osadu czynnego w reaktorze biologicznym, jak i warunków panujących w zbiorniku membranowym. Na dobre oczyszczenie ścieków po III-ciej serii badań, z pewnością wpłynęła ciągłość pracy instalacji. Krótsze przebywanie ścieków w komorze napowietrzania spowodowało obniżenie zawartości azotu azotanowego powstałego w wyniku nityfikacji. Poprzez ulepszenie sposobu natleniania ścieków w komorze, nie dochodziło do pojawiania się długotrwałych warunków beztlenowych, a tym samym do uwalniania fosforu przez bakterie fosforanowe.

Tabela 4. Właściwości fizyczno-chemiczne ścieków surowych i oczyszczonych w I-szym etapie badań**Table 4.** Physico-chemical properties of raw and treated wastewater in the 1st of the study

Parametr	Ścieki surowe	Oczyszczone ścieki z RM					Oczyszczone ścieki z RB				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Dzień badań	Próbka śr.	42	35	25	22	34	73	45	32	29	34
ChZT, mg O ₂ /l	915	42	35	25	22	34	73	45	32	29	34
BZT ₅ , mg O ₂ /l	334	–	–	6	7,5	8,3	–	–	9,5	6,6	7,5
N _{og} , mg N/l	85,5	9,95	7,19	18,9	9,9	20,8	13,6	12,0	6,81	7,75	6,68
P _{og} , mg P/l	10,1	27,3	19,6	0,77	0,10	1,78	1,45	0,82	0,18	0,16	0,19
Zawiesina, mg/l	447	3,31	0,51	0,25	0,61	0,48	20,2	5,44	2,52	3,25	3,11
Przewodność μS/cm	–	1430	1467	1511	1488	1494	1434	1571	1561	1599	1576

Tabela 5. Wyniki analizy mikrobiologicznej ścieków oczyszczonych w I-szym etapie badań**Table 5.** The results of the microbiological analysis of wastewater obtained in treated the 1st of the study

Parametr, jtk/lml	Dzień badań	Oczyszczone ścieki z RB			Oczyszczone ścieki z RM		
		1	2	3	1	2	3
Liczba kolonii mikroorganizmów, 36°C po 48h					2x10 ³	2x10 ³	2,2x10 ³
Liczba kolonii mikroorganizmów, 22 °C po 72h					4x10 ⁴	1x10 ⁴	–
Bakterie grupy <i>coli</i>					4,6x10 ³	1,2x10 ²	1x10 ²
<i>Escherichia coli</i>					0	0	0
Enterokoki (paciorkowce kałowe)					0	0	0

Tabela 6. Właściwości fizyczno-chemiczne ścieków surowych oraz oczyszczonych w II-gim etapie badań
Table 6. Physico-chemical properties of raw and treated wastewater in the 2nd stage of the study

Parametr	Ścieki surowe	Oczyszczone ścieki z RM								Oczyszczone ścieki z RB						
		6	7	8	9	10	6	7	8	9	10					
Dzień badań	Próbka śr.	915	31	30	31	29	29	29	29	29	35	33	35	32	32	42
ChZT, mg O ₂ /l	334	-	-	2,96	2,93	4,33	-	-	5,7	5,35	6,7	6,48	9,53	0,30	0,54	18
BZT ₅ , mg O ₂ /l	85,5	23,3	6,20	14,3	16,7	6,59	6,96	0,28	0,22	0,30	0,54	18	1170	1544	1428	1449
N _{org} , mg N/l	10,1	2,73	5,89	2,26	1,03	12,1	7,7	6,5	4,9	9,0	18	1133	1544	1428	1449	1440
P _{org} , mg P/l	447	0,4	0,7	0,1	0,2	2,0	1331	1538	1385	1413	1413	1385	1538	1331	1440	1440
Zawiesina, mg/l	-	1413	1385	1538	1331	1440	1428	1449	1544	1170	1544	1428	1449	1544	1170	1133
Przewodność μS/cm	-	1413	1385	1538	1331	1440	1428	1449	1544	1170	1544	1428	1449	1544	1170	1133

Tabela 7. Wyniki analizy mikrobiologicznej permeatu w II-gim etapie badań

Table 7. The results of the microbiological analysis of the permeate obtained in the 2nd stage of the study

Parametr, jtk/lml	Oczyszczone ścieki z RM							
	6	7	8	9	10	6	7	8
Dzień badań	6	7	8	9	10	6	7	8
Liczba kolonii mikroorganizmów, w 36 °C po 48h w 1 ml	2,5x10 ⁴	1,76x10 ⁴	1,5x10 ⁴	-	-	2,5x10 ⁴	1,76x10 ⁴	1,5x10 ⁴
Liczba kolonii mikroorganizmów, w 22 °C po 72h w 1 ml	3x10 ⁵	5,3x10 ⁴	-	-	-	3x10 ⁵	5,3x10 ⁴	-
Bakterie grupy <i>coli</i>	2,1x10 ³	4,6x10 ²	1,2x10 ²	-	-	2,1x10 ³	4,6x10 ²	1,2x10 ²
<i>Escherichia coli</i>	0	0	0	-	-	0	0	0
Enterokoki (paciorkowce kałowe)	0	0	0	-	-	0	0	0

Tabela 8. Właściwości fizyczno-chemiczne ścieków surowych oraz oczyszczonych w III-cim etapie badań
Table 8. Physico-chemical properties of raw and treated wastewater in the 3rd stage of the study

Parametr	Ścieki surowe Próbka średnio- dobowa	Oczyszczzone ścieki z RM		Oczyszczzone ścieki z RB	
		14	15	14	15
ChZT, mg O ₂ /l	969±77	27±1	29±2	37±2	43±3
BZT ₅ , mg O ₂ /l	386±69	0,62	0,54	2,88	1,29
N _{org} , mg N/l	92,2	2,01	3,48	6,07	5,22
P _{org} , mg P/l	10,8±1,1	0,14	2,2	0,17	0,18
Zawiesina, mg/l	605±36	0,2	0,8	3,6±0,2	4,6±0,3
Mętność, NTU		0,08	0,91	0,99	1,7
Przewodność, µS/cm	–	1463	1357	1468	1471

Tabela 9. Wyniki analizy mikrobiologicznej permeatu w III-cim etapie badań
Table 9. The results of the microbiological analysis of the permeate obtained in the 3rd stage of the study

Parametr, jtk/lml	Ścieki oczyszczzone z RM	
Dzień badań	11	12
Liczba kolonii mikroorganizmów w 36 °C po 48h w 1 ml	>300	>300
Liczba kolonii mikroorganizmów w 22 °C po 72h w 1 ml	>300	-
Bakterie grupy coli	1,4x10 ³	1,4x10 ³
Escherichia coli	0	0
Enterokoki (paciorkowce kałowe)	0	0

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że na efektywność usuwania azotu oraz fosforu, duże znaczenie ma obecność tlenu. Zbyt długie przetrzymanie ścieków w warunkach tlenowych powodowało powstawanie azotanów w procesie nityfikacji. Według badaczy efektywnemu usuwaniu związków azotu sprzyja stężenie tlenu o wartości zaledwie 0,5 mg O₂/l. Z kolei warunki deficytu tlenu były przyczyną gwałtownego uwalniania fosforu przez bakterie fosforowe. W celu bardziej efektywnego usuwania związków biogenych koniecznym byłoby wprowadzenie automatycznego sterowania stężeniem dozowanego tlenu.

Efektom zastosowania membrany – jako separatora biomasy jest częściowa dezynfekcja oczyszczanych ścieków. Niektóre bakterie, w tym bakterie typu kałowego i enterokoki, które stanowią w wodzie poważne zagrożenie dla zdrowia ludzi, są przez membranę ultrafiltracyjną całkowicie zatrzymywane. Natomiast bakterie *coli* i bakterie pozostałe częściowo przechodzą do filtratu, jednak ich liczba jest zdecydowanie mniejsza ($1,4 \times 10^3$) w porównaniu ze ściekami pobranymi z osadnika wtórnego ($1,1 \times 10^5$).

Stwierdzono, że w dwóch pierwszych etapach badań, (kiedy instalacja nie miała ciągłości pracy), jakość permeatu pod względem mikrobiologicznym się pogarsza. Po wprowadzeniu ciągłości pracy instalacji, jakość oczyszczanych ścieków uległa znacznej poprawie. Uzyskane rezultaty spełniają wartości dopuszczalne, a oczyszczone ścieki mogą być odprowadzane do odbiornika.

Praca okresowa instalacji powoduje duże wahania jakości oczyszczonych ścieków. Nie są one związane z pracą membrany, ale z obecnością osadu czynnego. Dlatego, aby uzyskać jak najbardziej efektywną pracę układu MBR, instalacja powinna pracować w trybie ciągłym.

Należy obserwować zmiany parametrów pracy instalacji (ciśnienie filtracji permeatu, przepływ permeatu) po płukaniu wstecznym, w celu dostosowania odpowiedniej częstotliwości czyszczenia membran i nie tracić niepotrzebnie uzyskanego produktu oczyszczania oraz nie podwyższać zużycia energii elektrycznej.

4.2. Oczyszczanie ścieków w ZOŚ

Wyniki badań realizowanych w oczyszczalni ścieków ZOŚ z wykorzystaniem technik membranowych w dwóch ciągach reaktorów z zanurzonymi modułami membranowymi BIO-CEL[®] firmy Microdyn Nadir,

podano w tabeli 10. Ilość ścieków dopływających do oczyszczalni wynosi średnio 250 m³/d, przy czym w okresie opadów wzrasta.

W tabeli 10 podano zakres oraz średnie wartości stężeń zanieczyszczeń w ściekach dopływających i oczyszczonych po reaktorze membranowym wykonane przez akredytowane laboratorium oraz analizy wykonane w badaniach własnych [12].

Tabela 10. Jakość ścieków surowych i oczyszczonych
Table 10. Quality indicators of raw wastewater and the effluent

Wskaźniki jakości	Zakres/średnia		
	Badania w laboratorium firmowym		
	Ścieki surowe	Ścieki oczyszczone	Stopień usuwania
BZT ₅ , gO ₂ /m ³	343	0,6–7,0/3,7	99,0%
ChZT, gO ₂ /m ³	954	17–26/22	97,6%
Zawiesina ogólna, g/m ³	448	<2–10,0/5,7	98,7%
Wskaźniki jakości	Badania własne		
	Ścieki surowe	Ścieki oczyszczone	Stopień usuwania
ChZT, gO ₂ /m ³	684–882/752	49,8–45,3/48,1	93,6%
Zawiesina ogólna, g/m ³	450–467/457	1,28–1,33/1,3	99,7%
Azot ogólny, gN/m ³	101	47–70/61	39,6%
Fosfor ogólny, gP/m ³	7,4	5,6–5,7/5,67	23,0%

Analizy jakości ścieków dopływających do oczyszczalni wskazują, że średnie stężenia zanieczyszczeń dla podstawowych wskaźników zanieczyszczeń oraz fosforu są wysokie, szczególnie stężenie azotu ogólnego co jest charakterystyczne dla ścieków z małych oczyszczalni [11].

Na podstawie jakości ścieków oczyszczonych stwierdzono wysoką efektywność oczyszczania w badanej oczyszczalni z biologicznym reaktorem membranowym. Ścieki oczyszczone odpływające do odbiornika w każdym przypadku były bezbarwne, bezwonne i klarowne. We wszystkich analizowanych próbkach dla wskaźników opisujących materię organiczną: BZT₅, ChZT i zawiesinę ogólną, stężenia zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych do odbiornika były dużo niższe od dopusz-

czalnych wartości według aktualnego pozwolenia wodnoprawnego i Rozporządzenia Ministra Środowiska [13]. Efektywność usuwania BZT₅ w oczyszczalni wynosiła 99,0%, a ChZT ponad 93,6%. Efektywność usuwania zawiesiny ogólnej wynosiła ok. 99,7%. Średni stopień usuwania azotu wyniósł prawie 40%, a fosforu 23,0%.

Uzyskane wyniki usuwania zanieczyszczeń, wyrażonych wskaźnikami: BZT₅, ChZT i zawiesiny ogólnej są porównywalne z wynikami badań uzyskanymi na innych obiektach [5,8,9]. Efektywność usuwania substancji biogenych jest typowa jak dla układów konwencjonalnych zaprojektowanych bez usuwania biogenów.

5. Wnioski

1. Stężenia zanieczyszczeń dopływających do badanych oczyszczalni COŚ i ZOŚ, były zbliżone.
2. Porównując efektywność oczyszczania ścieków w MBR w skali ćwierćtechnicznej (COŚ) i pełnej skali technicznej (ZOŚ), stwierdzono wysokie usunięcie podstawowych zanieczyszczeń, mieszczące się w przedziale 93–99%.
3. Stopień usuwania onalizowanych zanieczyszczeń jest zdecydowanie wyższy od uzyskiwanego w klasycznych ciągach oczyszczalni biologicznych, oraz od wymagań określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska [13].
4. Istotnym osiągnięciem wynikającym z badań w COŚ jest ustalenie faktu, że jakość permeatu w dużym stopniu zależy od ilości dostarczanego tlenu do zbiornika osadu czynnego i do zbiornika z modulem membranowym.
5. Najbardziej efektywną pracę układu MBR uzyskano dla instalacji pracującej w trybie ciągłym.

Literatura

1. **Bodzek M., Bohdziewicz J., Konieczny K.:** *Techniki membranowe w ochronie środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
2. **Bodzek M., Konieczny K.:** *Wykorzystanie procesów membranowych w uzdatnianiu wody*. Wydawnictwo Projprzem-EKO, Bydgoszcz, Wydanie I. 2005.
3. **Ćwikła J., Konieczny K.:** *Treatment of Sludge Water with Reverse Osmosis*. Environmental Protection Engineering. 37(4), 21–34 (2011).

4. **Hermanowicz S.W.:** *Membrane Bioreactors: Past, Present and Future?* Water Resources Collections and Archives, University of California, Berkeley 2011.
5. **Judd S., Judd C.:** *The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment.* Second Edition, Elsevier 2011.
6. **Łobos E., Bodzek M.:** *Wpływ zastosowania technik membranowych w bioreaktorach na zwiększoną biodegradację zanieczyszczeń.* Monographs of Env. Eng. Committee PAN, „Membrany i procesy membranowe w ochronie środowiska”. Warszawa-Gliwice, 22, 623–629 (2004).
7. **Konieczny K., Ćwikła J., Szoltysek M.:** *The application of the membrane reactor to separation processes at a wastewater treatment plant.* Monographs of Envi. Eng. Committee PAN, „Membrany i procesy membranowe w ochronie środowiska”. Warszawa-Gliwice, 119, 79–92 (2014).
8. **Melin T., Jefferson B., Bixio D., Thoeye De Wilde W., De Koning J., van der Graaf J., Winntgens T.:** *Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse.* Desalination, 187, 271–282 (2006).
9. *Membrane Bioreactors.* WEF Manual and Practice 36, 2011, ISBN 978-0-07-175366-1.
10. **Mrozowska J. (red.):** *Laboratorium z mikrobiologii ogólnej i środowiskowej,* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
11. **Mucha Z., Mikosz J.:** *Analysis of unit pollution loads for small wastewater treatment plants.* E. Plaza, E. Levlin, Report No 15, Research and application of new technologies in Ukraine, Sweden and Poland, Stockholm 2010, 63–66, ISBN 978-91-7415-412-2
12. **Mucha Z.:** *Preliminary operating experience at the sewage treatment plant with membranę biological reactors,* Monograph of Envi. Eng. Committee PAN, „Membrany i procesy membranowe w ochronie środowiska”. Warszawa-Gliwice, 119, 71–77 (2014).
13. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 roku w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, *Dz. U. Nr 137 z 2006 poz. 984*
14. **Szewczyk K.:** *Bioreaktory membranowe w ochronie środowiska.* Wodociągi i Kanalizacja, 39(5), 61–63 (2007).
15. **Witkowska E.:** *Usuwanie azotu w biologicznych reaktorach membranowych – doświadczenia zagraniczne i badania własne.* Gaz, woda i technika sanitarna, 7–8, 37–40 (2009).

Effectiveness of Wastewater Treatment with the Use of the Biological Membrane Reactors

Abstract

The paper compares the effectiveness of MBR reactor working on the pilot scale in the COŚ sewage treatment plant (No 1) with MBR in treatment plant ZOŚ (No 2) working on the full technical scale.

In the COŚ wastewater treatment plant reactor was working in hybrid system: biological reactor with classical treatment – ultrafiltration (**RM**). It was compared the purification effectiveness of the classical biological reactor with secondary settling tank (**RB**), with purification effects obtained using membrane module (**RM**) fulfilling the role of secondary settling tank. Membrane installation **BIO-CEL®-BC 10** type has been placed outside the activated sludge reactor. In the study the PES membrane (area 10 m²), made by the German company Microdyn-Nadir GmbH, has been used. In the first stage of the work, the results of physico-chemical analyses for raw and purified sewage for both systems, has been presented. The following pollutants indexes were determined: chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD₅), the concentration of total nitrogen (N_{og}), the concentration of total phosphorus (P_{og}), suspension content, turbidity and conductivity at 25°C. In addition, for the determination of the filtration effectiveness, microbiological tests were carried out to check if permeate can poses a threat in terms of people health.

In the second part of the publication, the preliminary results of effectiveness of the wastewater treatment for the full technical scale in the sewage treatment plant ZOŚ (No 2) have been presented. For small bulk treatment plant with biological membrane reactors (MBR), exploitation conditions are given. Analyzed treatment plant, as a result of modernization, consists of a compact device for mechanical wastewater treatment and activated sludge reactor. Biological reactor applied PES ultrafiltration membranes made, as in the case COŚ, by Microdyn-Nadir GmbH. Membrane module fulfilled the same role as the classic secondary clarifier and served to separate purified wastewater from activated sludge. Analysis of wastewater quality confirmed high removal efficiency of organic pollutants (an average of 99% for BOD₅ and above 97% for COD) and suspended solids (average 99%) in the studied sewage treatment plant.

Comparing the efficiency of wastewater treatment in COŚ and ZOŚ sewage treatment plants, in which MBR has been installed, respectively in the pilot and full technical scale, removal degree of impurities was very high, in the range of 93–99%. The level of contaminants in both tested plants was similar. Obtained very high removal degrees of all determined pollutants, were definite-

ly higher than that obtained in the classical biological treatment plants and definitely higher than the requirements given in regulation of the Environmental Minister [13]. An important achievement resulting from the research in COŚ treatment plant, supported by the results, is statement that permeates quality largely depends on the amount of oxygen delivered to the activated sludge tank and to the tank with membrane module. The best results were obtained for MBR system working in the continuous mode.

Słowa kluczowe:

biologiczne oczyszczanie ścieków, ultrafiltracja, biologiczne reaktory membranowe (MBR)

Keywords:

biological wastewater treatment, ultrafiltration, membrane biological reactors (MBR)