

Zastosowanie sondy do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego jako elementu sterowania procesem oczyszczania ścieków

Implementation of the ammonium and nitrate sensor as an element of wastewater treatment process control

Alina Dereszewska

Akademia Morska w Gdyni, Wydział Przedsiębiorczości i Towaroznawstwa,
Katedra Chemii i Towaroznawstwa Przemysłowego, alina@am.gdynia.pl

Stanisław Cytawa

Oczyszczalnia Ścieków „Swarzewo”, scytawa@wp.pl

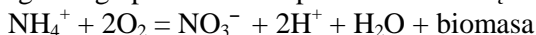
Abstract

The paper presents the potential benefits of modification of the control system of wastewater treatment in the "Swarzewo" Municipal Sewage Treatment Plant. Currently, process control is based on the determined filling level of the reactor and wastewater aeration time, regardless the concentration of pollutants in the inflow. It results in insufficient degree of removal of nitrogen compounds from wastewater aeration and unnecessary aeration of wastewater already treated. It generates additional costs because of exceeded energy consumption and environmental fees as well. The plant energy balance can be improved by supporting the existing technology by analysis of key parameters of wastewater treatment. Due to the fact that the oxidation of nitrogen compounds is the longest process of sewage mineralization, that parameter can be used as an indicator of the necessary treatment time determination. The treatment plant control system based on the content of ammonium and nitrate allows to reduce 13,3% of the blower's energy consumption and to achieve stabilization of the outflow parameters of the treatment plant.

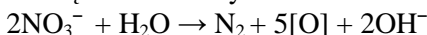
Keywords: wastewater treatment, efficient process control, nitrogen removal

Wstęp

Postępująca eutrofizacja wód Morza Bałtyckiego spowodowana doprowadzeniem do nich nadmiernych ilości azotu i fosforu oraz fakt, że znaczne ich ilości są pochodzenia ściekowego, narzuciły konieczność usuwania biogenów ze ścieków. Obecnie do oczyszczania ścieków komunalnych wykorzystuje się systemy ze zintegrowanym usuwaniem związków węgla, azotu i fosforu, w których oczyszczanie przebiega w warunkach beztlenowo- tlenowych. Zawarty w ściekach azot, najczęściej w zredukowanej postaci azotu amonowego, wpływa szczególnie niekorzystnie na zbiorniki wodne, ponieważ jest czynnikiem zużywającym tlen. Wskutek procesów mikrobiologicznych ulega utlenieniu (nityfikacji) obniżając stężenie tlenu rozpuszczonego w zbiornikach wodnych. Związki amonowe w sprzyjających warunkach (temperatura, pH) mogą spowodować wzrost stężenia trującego dla ryb amoniaku. Oprócz tego, jak już wyżej nadmieniono, azot jest czynnikiem biogenym. Z tych względów eliminacja azotu z odprowadzanych z oczyszczalni ścieków jest niezbędna. Biologiczne usuwanie azotu ze ścieków jest procesem bardzo złożonym, gdyż odbywa się wieloetapowo. Azot amonowy w wyniku dwustopniowego utleniania biologicznego przechodzi w postać azotanową¹:



W warunkach beztlenowych mikroorganizmy redukują powstałe azotany do czystego azotu, który ulatnia się do atmosfery:



Pierwszy z powyższych procesów wymaga dostarczenia przez dmuchawy tlenu niezbędnego do utlenienia azotu amonowego (nityfikacji). W drugim procesie (denityfikacji) źródłem tlenu (dla bakterii utleniających proste związki węglowe) są jony azotanowe. Poprzez pomiar azotanów możliwe jest wykorzystanie źródła tlenu ze związków chemicznych zmniejszając tym samym zużycie energii elektrycznej. Pomiar azotanów sprzężony z funkcją precyzyjnego sterowania wyłączeniem napowietrzania, zmniejsza tym samym marnotrawstwo energii związane z odprowadzaniem do oczyszczonych ścieków utlenionych związków azotowych.

Proces napowietrzania jest jednym z najbardziej energochłonnych procesów w technologii oczyszczania ścieków. Napowietrzanie może zużywać od 54% - 97% energii zużywanej przez oczyszczalnię (w zależności od jej rozmiaru), a koszt zużytej w tym procesie energii stanowi 15- 40% całego budżetu oczyszczalni².

¹ Bever J., Stein A., Teichmann H., 1997. *Zaawansowane metody oczyszczania ścieków*. Oficyna Wydawnicza Projprzem-Eko, Bydgoszcz..

² *Wastewater treatment: Bubbling up for major energy saving.*, Filtration & Separation 48(4), 2011, s. 42-43.

W przemyśle oczyszczania ścieków nie występują konkretne przepisy nakładające obowiązek stosowania rozwiązań zgodnych ze zrównoważonym rozwojem i wykorzystaniem energii. Jednakże wysokie ceny energii, a także dyrektywy unijne promujące efektywne jej zużycie^{3,4} spowodowały że coraz częściej poszukiwane są rozwiązania projektowe i wykorzystywane środki technologiczne, mające na celu poprawę efektywności energetycznej z jednoczesnym spełnieniem wymogów wysokiej jakości oczyszczania ścieków. Bardzo skutecznym sposobem na poprawienie bilansu energetycznego jest stosowanie beztlenowych procesów oczyszczania ścieków, dzięki którym wytwarzany jest biogaz. Jego efektywna produkcja i przetwarzanie może doprowadzić do pełnego zaspokojenia potrzeb energetycznych oczyszczalni, a nawet do produkcji nośnika nadmiernej energii^{5,6}. Znaczne oszczędności energetyczne (dochodzące do 50% energii użytkowanej na dany proces) można osiągnąć również poprzez odpowiednią organizację procedur związanych z technologią oczyszczania ścieków (np. częściową redukcję recyrkulacji osadu), a także poprzez minimalizację stosowanych urządzeń⁷. Skuteczne okazały się również nowatorskie rozwiązania dotyczące napowietrzania ścieków. W oczyszczalni ścieków w Hidalgo (Meksyk), stosując technologię polegającą na rozdrobnieniu pęcherzyków powietrza², a tym samym zwiększeniu kontaktu ścieków z tlenem, zredukowano użytkowaną energię o 46%, równocześnie zwiększając wydajność oczyszczalni do 140%. Ograniczenie energii zużywanej do napowietrzania ścieków możliwe jest również dzięki zastosowaniu wysokoefektywnych systemów sterowania. Zastosowanie precyzyjnych sensorów umożliwia przykładowo sterowanie napowietrzaniem, fazami nitrifikacji i denitrifikacji, recyrkulacją, prowadząc do redukcji zużycia energii w tych procesach, a także do poprawy parametrów oczyszczania ścieków⁶.

W niniejszym artykule przedstawiono jedno z energooszczędnych rozwiązań możliwych do wdrożenia w oczyszczalniach ścieków. Jego założeniem jest ograniczenie zużycia energii w procesie napowietrzania poprzez włączenie do systemu sterowania sondy do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego.

³ Dyrektywa 2005/32/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej, 6.07. 2005 r.

⁴ Zielona Księga w sprawie racjonalizacji zużycia energii: zrobić więcej za mniej. COM(2005) 265, Bruksela.

⁵ Kołtyś S., Szymanek M., Dreszer K.A., 2009. *Ocena technologii produkcji biogazu ze ścieków miejskich na przykładzie oczyszczalni ścieków „HAJDÓW”*. Inżynieria Rolnicza 6(115), s. 155-160.

⁶ Sionkowski T., 2011. *Wybrane sposoby poprawy bilansu energetycznego ścieków*. Forum eksploatatora 6, s. 46-49.

⁷ Bennett A., 2007. *Energy efficiency: Wastewater treatment and energy production*. Filtration & Separation 44 (10), s. 16-19.

1. Sterowanie oczyszczalnią ścieków w Swarzewie

Oczyszczalnia w Swarzewie ma na celu oczyszczanie ścieków komunalnych, pochodzących głównie z gospodarstw domowych. Oczyszczone ścieki są odprowadzane do Morza Bałtyckiego. Zakład służy ochronie środowiska, lecz faktem jest, że zużycie energii wykorzystywanej do prowadzenia działalności oczyszczalni oraz okresowe przekraczanie parametrów odpływu w zakresie odprowadzanych ilości azotu, określonych przez pozwolenie wodno-prawne, stanowi obciążenie dla środowiska naturalnego i generuje znaczne koszty dla przedsiębiorstwa.

Oczyszczalnia rocznie oczyszcza średnio 2,3 mln m³ ścieków, usuwając około 97% zanieczyszczeń i zużywając 1.967.032 kWh energii elektrycznej rocznie. W oczyszczalni prowadzony jest również proces biologicznej redukcji azotu, który jako pierwiastek biogeny przyczynia się do eutrofizacji wód. Utlenianie związków azotu jest najdłuższym procesem mineralizacji, związanym z najintensywniejszym poborem tlenu. Do utlenienia 1g związków organicznych (określonych jako BZT₅) zużywa się 1g tlenu, natomiast utlenienie 1g azotu ze związków amonowych zużywa aż 4,6 g tlenu¹. Zgodnie z pozwoleniem wodno prawnym, ścieki odprowadzane przez oczyszczalnię do Morza Bałtyckiego nie mogą zawierać stężeń związków amonowych przekraczającego 10 mg/ dm³ (liczone jako średnia roczna).

Technologia oczyszczania ścieków w Swarzewie wykorzystuje cykliczną pracę 4 reaktorów typu SBR (Sekwencyjne Reaktory Biologiczne) o pojemności 4000 m³ każdy. SBR to rodzaj oczyszczalni biologicznej z cyklicznym przepływem ścieków przez instalację. W reaktorze podczas jednego cyklu następują kolejno po sobie fazy :

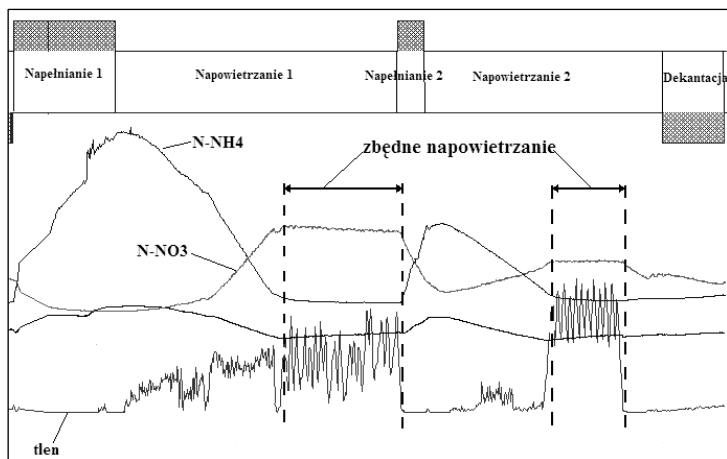
1. pierwsze napełnianie (do poziomu 87% objętości reaktora), podczas którego ścieki utrzymywane są w warunkach beztlenowych, co jest niezbędne dla zapewnienia denitryfikacji w procesie usuwania azotu
2. napowietrzanie ścieków (średnio 6h)
3. drugie napełnienie (do 100%),
4. napowietrzanie ścieków (średnio 6h)
5. sedymentacja
6. dekantacja (odprowadzenie ścieków oczyszczonych – ok. 1400 m³).

Czas trwania pierwszej fazy jest zmienny i zależy jedynie od szybkości strumienia ścieków dopływających. Z tego względu, czas w którym w reaktorze utrzymane są warunki beztlenowe, bywa zbyt krótki, aby zapewnić proces pełnej denitryfikacji (usunięcia azotu). Kolejny proces, polegający na tlenowej mineralizacji związków organicznych przez mikroorganizmy osadu czynnego, odbywa się

również w czasie niezależnym od stężenia zanieczyszczeń. Mineralizacja wymaga dostarczenia mikroorganizmom znacznej ilości tlenu, co wiąże się z dużym zużyciem energii. W oczyszczalni zainstalowane są dmuchawy o mocy znamionowej 90 kW, które tłoczą powietrze, dostarczają do bioreaktora tlen. Praca dmuchaw sterowana jest automatycznie. Czas napowietrzania nie jest jednak determinowany żadnym z automatycznie odczytywanych parametrów. Ustalany jest sezonowo, na podstawie analizy parametrów (czasy napełniania, wyniki analiz chemicznych z laboratorium) i w oparciu o doświadczenie technologa. Bardzo często musi być również korygowany przez pracowników oczyszczalni śledzących na bieżąco wykresy dostępnych parametrów. Napowietrzanie odbywa się aż do uzyskania w ściekach stężenia tlenu na poziomie 2 mg/dm^3 . W przypadku ścieków rozcieńczonych, dochodzi często do sytuacji, gdy ścieki zostają już zmineralizowane, a mimo to dmuchawy utrzymują żądany poziom tlenu, napowietrzając oczyszczone ścieki, aż do zakończenia zaprogramowanego czasu. Bywa również przeciwna sytuacja, gdy ścieki zawierają duże stężenie związków amonowych. Wówczas zaprogramowany czas napowietrzania jest niewystarczający do utlenienia obecnych w ściekach związków azotu i nieczyszczone ścieki zostają odprowadzane do Morza Bałtyckiego.

2. Analiza wyników sondy do pomiaru zawartości azotu

Utlenianie związków azotu (nityfikacja) jest najdłuższym procesem mineralizacji, związanym z poborem tlenu¹. Oznacza to, że czas nityfikacji stanowi wyznacznik czasu niezbędnego do procesu mineralizacji ścieków w danym cyklu oczyszczania. Z tego względu, bezpośrednio w komorze sekwencyjnego reaktora SBR, zainstalowano sondę do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego. Jej wskazania umożliwiły precyzyjne określenie czasu mineralizacji ścieków, skorelowane z dawką związków azotu dopływającą w ściekach (rys. 1).



Źródło: Opracowanie własne na podstawie wydruku z komputera sterowni oczyszczalni.

Rys. 1. Wskazania sondy do pomiaru azotu amonowego i azotanowego na tle innych pomiarów systemu komputerowego oczyszczalni w Swarzewie.

W tabeli 1, dla wybranych cykli oczyszczania ścieków, porównano czas ich napowietrzania z czasem procesu nityfikacji. Z różnicy tych wartości wyznaczono nadmierny czas napowietrzania.

Tabela 1. Czas napowietrzania osadu (a,c) w zestawieniu z czasem natlenienia niezbędnym dla procesu nityfikacji (b,d) dla wybranych cykli mineralizacji ścieków w oczyszczalni Swarzewo

Data pomiaru	Czas [min]				
	Natlenianie1 a	Nityfikacja1 b	Natlenianie2 c	Nityfikacja2 d	Nadmiar (a-b) +(c-d)
21.07.2012	263	240	271	222	72
29.07.2012	456	422	241	94	161
01.08.2011	134	134	902	274	628
05.08.2011	330	330	311	156	155
13.08.2011	367	323	382	119	307
30.08.2011	392	303	346	76	359
06.09.2011	382	231	341	155	337
11.09.2011	459	244	345	165	395
25.09.2011	500	229	346	135	482
16.10.2011	484	118	362	236	552

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Analiza trzymiesięcznych wskazań sondy (od 21.07.2011 do 20.10.2011) wykazała, że w tym okresie przez 280 godzin stosowane było zbędne napowietrzanie ścieków oczyszczonych. Równocześnie w 10 cyklach wystąpiły przypadki, gdy czas napowietrzania był zbyt krótki, aby przeprowadzić pełną nityfikację, co skutkowało odprowadzeniem ścieków z nadmierną ilością azotu amonowego [tabela 2]. W tych cyklach, ze względu na wysokie stężenie azotu amonowego w dopływających ściekach, należało wydłużyć czas napowietrzania, aby umożliwić pełną jego nityfikację. Sumarycznie, dla cykli zestawionych w tabeli 2, brakujący czas napowietrzania wynosi 29 godzin i 20 minut.

Tabela 2. Porównanie parametrów procesu nityfikacji dla cykli z deficytem napowietrzania ścieków w oczyszczalni Swarzewo.

Data pomiaru	Stężenie N-NH ₄ na dopływie [mg/dm ³]	Całkowity czas napowietrzania [min]	Parametry po natlenianiu w cyklu	
			N-NH ₄ [mg/dm ³]	Czas brakujący do pełnego utlenienia [min]
22.07.2011	34,2	313	12	93
23.07.2011	47	236	31,5	436
28.07.2011	46,1	260	25,4	370
06.08.2011	47,7	413	19,4	190
06.08.2011	47,8	371	17,6	160
07.08.2011	42,4	435	4,7	28
08.08.2011	47,1	689	6,3	53
11.08.2011	64,8	306	5,2	28
13.09.2011	37,4	469	19,1	322
28.09.2011	57,3	411	13,5	80

Źródło: Opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań

Na podstawie parametrów zestawionych w tabeli 2 można zaobserwować, że szybkość procesu nityfikacji dla poszczególnych cykli znacznie się różni. Z tego względu, niewystarczająca jest informacja o stężeniu związków azotowych w dopływających ściekach, aby oszacować niezbędny czas ich natleniania. Zastosowana w doświadczeniu kombinowana sonda do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego umożliwia odczyt dynamicznie zmieniających się wartości stężenia azotu amonowego (N-NH₄) oraz azotanów (N-NO₃). System sterowania pracą dmuchaw, w oparciu o jej odczyt, umożliwi na precyzyjne określenie czasu napowietrzania dostosowanego do ładunku związków amonowych dopływających w ściekach, uwzględniającego również różnice w kinetyce procesu nityfikacji.

3. Analiza kosztów

Roczne zużycie energii w oczyszczalni ścieków Swarzewo w roku 2011 wyniosło 1.967 MWh. Miesięczne zużycie energii uzależnione jest od ilości i stopnia zanieczyszczenia ścieków. Ze względu na turystyczny charakter regionu, w którym funkcjonuje oczyszczalnia, zużycie energii znacznie wzrasta w miesiącach letnich (od 120 MWh do 250 MWh). W trzymiesięcznym okresie pracy oczyszczalni, gdy prowadzony był eksperyment, zużycie energii wyniosło 544 MWh, co przekłada się na koszt 206.745 złotych.

Jak już nadmieniono, w okresie tym 280 godzin zbędnie napowietrzano ścieki, co wiązało się z pracą dmuchawy zużywającej w ciągu godziny 72 kW (moc 90 kW; współczynnik wykorzystania mocy 0,8), spowodowało nadmierowe zużycie 20,2 MWh energii i podwyższyło koszt oczyszczania ścieków o 7660 zł. W tym samym okresie trwania eksperymentu, zaobserwowano cykle oczyszczania, w których czas napowietrzania był zbyt krótki, aby przeprowadzić pełną nityfikację związków amonowych. W przypadku, gdyby sterowanie procesem oczyszczania bazowało na wskazaniach sondy do monitorowania nityfikacji, napowietrzanie wydłużyłoby się o 29 godzin i 20 minut, zużycie energii i kosztów wzrosłoby odpowiednio o 2.112 kWh i 803 zł. Sumarycznie, zastosowanie sondy zmniejszyłoby zużycie energii o 18.048 kWh i przyniosło oczyszczalni oszczędności 6857 zł. Zakładając, że zanalizowane nieścisłości w napowietrzaniu występują w takim samym stopniu w każdym z 4 użytkowanych reaktorów SBR, uzyskane ograniczenie energii stanowiłoby 13,3% energii zużytej przez oczyszczalnię w monitorowanym okresie czasu. Szacunkowo, w skali roku sterowanie procesem oczyszczania, w oparciu o wskazania sondy do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego, ograniczyłoby zużycie energii o 288.768 kWh, przynosząc oszczędności 109.732 zł rocznie.

Koszt zakupu instalacji i eksploatacji sondy, deklarowany przez producenta, wynosi 40.000 zł. Zainstalowanie sond w 4 używanych SBR-ach i przestawienie systemu sterowania napowietrzaniem na ich wskazania, zamortyzowałoby się po 18 miesiącach ich użytkowania.

Należy nadmienić, że zastosowanie sondy do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego ma wpływ nie tylko na energooszczędny i ekonomiczny wymiar pracy oczyszczalni. Nie mniej ważnym aspektem jest kontrola procesów nityfikacji i denityfikacji, umożliwiające wydajniejsze usuwanie biogenego pierwiastka, jakim jest azot, ze ścieków. Na szczególną uwagę zasługuje możliwość kontroli procesu denityfikacji, co w obecnym systemie sterowania jest niemożliwe.

Kontrolowane napowietrzanie skraca również czas oczyszczania ścieków, eliminując długotrwałe okresy napowietrzania ścieków już oczyszczonych. Tym samym wzrasta wydajność oczyszczalni, co w wielu przypadkach może być podstawą do rezygnacji z jej rozbudowy. Na terenach o wzmożonym sezonowo ruchu turystycznym oczyszczalnie muszą dostosować infrastrukturę do okresów najbardziej obciążonych. Precyzyjne sterowanie procesem, zwiększa częstotliwość napełniania istniejących reaktorów, a tym samym powoduje lepsze ich wykorzystanie. Średnio jeden cykl oczyszczania 1400 m³ ścieków trwa 12 godzin. W badanym trzymiesięcznym okresie czasu w jednym reaktorze, możliwe byłoby zagospodarowanie ok. 250 godzin, obecnie przeznaczonych na zbędne napowietrzanie. Umożliwiłoby to oczyszczenie dodatkowych 29.167 m³, co zwiększyłoby o 11,6% przepustowość jednego reaktora w badanym okresie czasu.

Podsumowanie

Automatyczne sterowanie procesem oczyszczania ścieków w oczyszczalni „Swarzewo” bazuje na ustalonej objętości ścieków w reaktorze oraz czasie napowietrzania, niezależnie od stężenia dopływających zanieczyszczeń. Skutkuje to niewystarczającym stopniem usunięcia związków azotowych ze ścieków bądź niepotrzebnym napowietrzaniem ścieków już oczyszczonych. Uniemożliwia również sterowanie procesem denitryfikacji, niezbędnym do usunięcia utlenionych związków azotu ze ścieków. W pracy wykazano, że wskazania sondy do pomiaru azotu amonowego i azotanowego są stabilne w warunkach procesu oczyszczania ścieków. Zastosowanie sondy jako czujnika w procesie sterowania oczyszczalnią, umożliwiłoby dynamiczną regulację czasu trwania faz nitrifikacji i denitryfikacji, zapewniając optymalizację czasu trwania procesu i tym samym wzrost przepustowości reaktora oraz bardziej skuteczne usuwanie związków azotowych. Wdrożenie zaproponowanej w pracy zmiany systemu sterowania oczyszczalnią prowadzi do oszczędności czasu i energii oraz poprawy parametrów oczyszczania ścieków.

Piśmiennictwo

1. Bennett A., 2007. *Energy efficiency: Wastewater treatment and energy production*. Filtration & Separation 44 (10), s. 16-19.
2. Bever J., Stein A., Teichmann H., 1997. *Zaawansowane metody oczyszczania ścieków*. Oficyna Wydawnicza Projprzem-Eko, Bydgoszcz.

3. Dyrektywa 2005/32/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej, 6.07. 2005 r.
4. Kołtyś S., Szymanek M., Dreszer K.A., 2009. *Ocena technologii produkcji biogazu ze ścieków miejskich na przykładzie oczyszczalni ścieków „HAJDÓW”*. Inżynieria Rolnicza 6 (115), s. 155-160.
5. Sionkowski T., 2011. *Wybrane sposoby poprawy bilansu energetycznego ścieków*. Forum eksploatatora 6, s. 46-49
6. Zielona Księga w sprawie racjonalizacji zużycia energii: zrobić więcej za mniej. COM(2005) 265, Bruksela.