

*Dariusz Zdebik**

KONTROLA NAPOWIETRZANIA KOMÓR BIOLOGICZNYCH PRACUJĄCYCH W TECHNOLOGII SEKWENCYJNO-PRZEPLYWOWEJ

Streszczenie

W artykule zawarto wyniki optymalizacji systemu napowietrzania dostarczającego powietrze do komór biologicznych pracujących w technologii BioDenipho. Opisano wyniki uzyskane przy zmniejszeniu stężenia tlenu, z zachowaniem długości czasu trwania fazy nitrifikacji oraz wyniki uzyskane przy zmianie czasu trwania fazy nitrifikacji i denitrifikacji. Przedstawiono wyniki wprowadzenia w oczyszczalni ścieków sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w oparciu o pomiary on line bezpośrednio w komorze biologicznej. Wprowadzenie tego systemu przyniosło oszczędności w zużyciu energii.

Control of the aeration of biological chambers working in the sequential-flow technology

Abstract

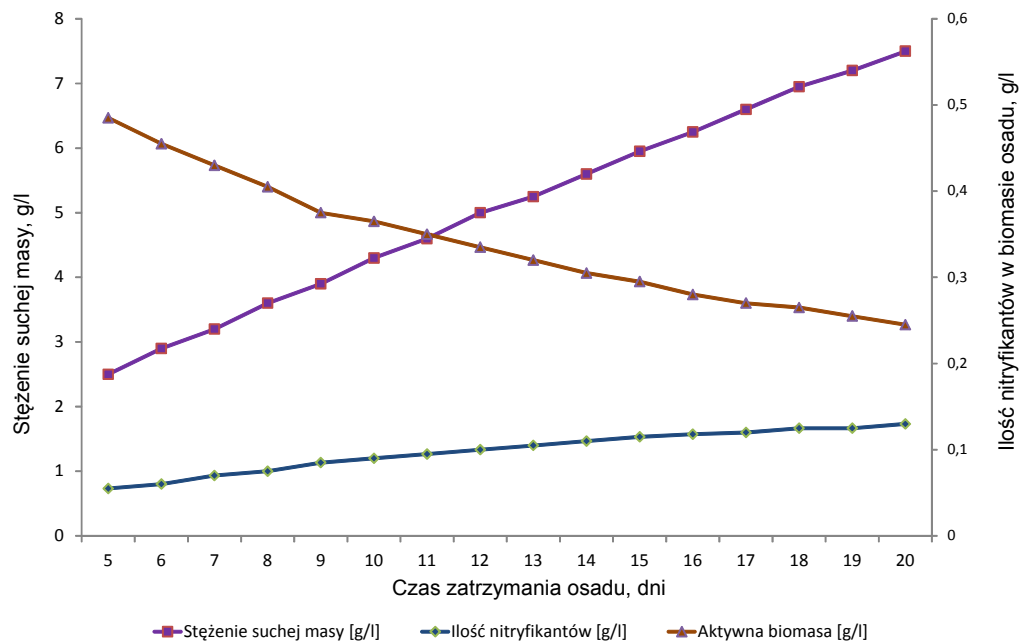
The paper contains the results of optimization of the aeration system supplying air to the biological chambers working in the BioDenipho technology. The results obtained by the introduction of reducing the oxygen concentration while keeping the duration of the nitrification phase, and the results obtained by changing the duration of the nitrification and denitrification phases have been described. The results of the introduction, in sewage treatment plant, of control of the dissolved oxygen concentration, based on on-line measurements directly in the biological chamber have been presented. The introduction of this system resulted in some energy savings.

1. WPROWADZENIE

Podstawę oczyszczania ścieków z wykorzystaniem technologii BioDenipho, stanowi zewnętrzna recyrkulacja osadu czynnego. Charakteryzuje się ona wysoką sprawnością usuwania związków biogenych zawartych w dopływie.

W technologii BioDenipho osad czynny z osadników wtórnych jest zawracany w recyrkulacji zewnętrznej do komory defosfatacji, w której miesza się ze ściekami. Stężenie osadu czynnego w komorach jest regulowane przez usuwanie osadu nadmiernego. Czas zatrzymania osadu (wiek osadu) w układzie powinien być dobrany tak, aby zapewnić prawidłowy przebieg procesów nitrifikacji i denitrifikacji. Na podstawie badań kinetycznych i stechiometrycznych parametrów technologicznych, Henze (Henze i in. 1987) określił zależność między stężeniem suchej masy a czasem zatrzymania osadu (rys. 1).

* Główny Instytut Górnictwa



Rys. 1. Zależność między stężeniem suchej masy osadu a aktywną biomasa i ilością nityfikantów (Henze i in. 1987)

Fig. 1. The relation between the concentration of suspended solids mixed liquor and the active biomass with the nitrificant amount (Henze et al. 1987)

Chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) w ściekach dopływających do układu jest wykorzystywane jako substrat w procesie denitryfikacji. W dopływie można wyróżnić biodegradowalne ChZT, które składa się z rozpuszczalnej łatwo przyswajalnej frakcji i wolno przyswajalnej zawiesiny (Marsman, Roeleveld, Rensink 1997). Wolno przyswajalna zawiesina adsorbowana na powierzchni kłaczek jest hydrolizowana i wykorzystywana jako substrat, natomiast ChZT łatwo rozpuszczalne, jest przyswajane przez mikroorganizmy w sposób szybki i ciągły (Bakmer i in. 1998).

Procesy denitryfikacji i nityfikacji wywołują spadek i wzrost w stosunku do odczynu pH w komorach osadu czynnego. Dlatego też pH w układzie z recyrkulacją zewnętrzną jest parametrem, który podlega samoregulacji. Zasadowość wytworzona podczas denitryfikacji jest równoważona w czasie nityfikacji – układ nie wymaga zewnętrznej stabilizacji pH, o ile ścieki dopływające do oczyszczalni nie wpływają istotnie na zmianę pH całego systemu.

2. MOŻLIWOŚCI OPTIMALIZACJI PROCESU BIOLOGICZNEGO OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

Analizie poddano głównie możliwości wykorzystania pomiarów on line do optymalizacji sterowania procesami napowietrzania komór oraz dynamicznego sterowania

fazami układu w zależności od stężenia amoniaku i azotanów w komorach osadu czynnego z zachowaniem płynności przejścia pomiędzy fazami.

Analizując sposób funkcjonowania procesu oczyszczania ścieków w technologii sekwencyjno-przepływowej, można wyznaczyć kilka warunków brzegowych, które przy odpowiednich modyfikacjach mogą wpłynąć na wydajniejszą pracę układu.

Schemat optymalizacji układu technologicznego, pracującego w oparciu o pomiary on line, przedstawiono poniżej.

Technologia sekwencyjno-przepływowa oczyszczania ścieków polega na rozdziale faz na tlenową i beztlenową. Faza beztlenowa jest jednym z najważniejszych procesów operacyjnych dla biologicznego usuwania azotu. Wydłużenie tej fazy zwiększa możliwości wykorzystania biodegradowalnego ChZT do redukcji azotanów, podczas gdy skrócenie fazy beztlenowej powoduje zwiększenie zdolności nityfikacji, tym samym zwiększa się zdolność utleniania amoniaku. Sterowanie długościami faz na podstawie pomiarów on line umożliwia lepsze usuwanie azotu całkowitego.

Efektywne prowadzenie procesu wymaga kontroli wieku osadu, który jest ważnym parametrem technologicznym, związanym z biologicznym usuwaniem azotu. Zmniejszenie wieku osadu czynnego skutkuje znaczącą redukcją zawiesiny w układzie, co umożliwia przyjęcie większych ładunków zanieczyszczeń do oczyszczalni. Uzupełnienie systemu kontroli układu technologicznego oczyszczalni o pomiary wieku osadu, umożliwia zmniejszenie kosztów biologicznego usuwania azotu.

Obieg azotanów w układzie sekwencyjno-przepływowym zaprojektowano jako zmienny pomiędzy fazami tlenowymi i beztlenowymi. Bez wykorzystania łatwo przyswajalnego ChZT, dopływającego ze ściekami surowymi lub dozowanego w postaci zewnętrznego źródła węgla organicznego do beztlenowej fazy, będzie ograniczona efektywność procesu redukcji azotanów (Zdebik, Głodniok 2010). Stąd, ważną kwestią jest zapewnienie ciągłego dopływu ścieków do fazy denityfikacji lub „wspieranie” tego procesu przez dozowanie zewnętrznych substratów.

Kontrolę napowietrzania, polegającą na pomiarach stężenia amoniaku i azotanów, można prowadzić dwoma sposobami. Pierwszym jest kontrola stężenia azotu amonowego (czujnik zwykle znajduje się przy wylocie z bioreaktora) na wcześniej wybranych ciągach technologicznych (Olsson 1976; Ko, Meinnis, Goodwin 1982; Olsson i in. 1985; Holmberg, Olsson, Andersson 1989; Marsili-Libelli 1989). Kontrola polega na pomiarze stężenia amoniaku do momentu aż osiągnie on założoną wartość, wówczas przepustnica napowietrzania ścieków zostaje automatycznie zamknięta i następuje zmiana fazy. Powoduje to efektywniejsze zmniejszenie stężenia azotanów, płynne sterowanie denityfikacją oraz obniżenie kosztów napowietrzania.

Innym sposobem jest utrzymanie sterowania napowietrzania w taki sposób, aby minimalizować stężenie azotu ogólnego w odpływie. W takim przypadku, proces nityfikacji i denityfikacji jest prowadzony na podstawie pomiarów amoniaku i azotanów. W procesie nityfikacji ilość nityfikantów w układzie jest określana przez ilość amoniaku utlenionego, natomiast podczas denityfikacji ilość heterotrofów jest niezależna od ilości azotanów usuniętych z układu. Podwyższona zawartość amoniaku w ściekach powoduje zmniejszenie ilości nityfikantów, a tym samym obniża zdolność nityfikacji. Wypośredkowanie pomiędzy efektywnym usuwaniem amoniaku

i azotanów może skutkować skróceniem czasu trwania faz beztlenowych na rzecz wydłużenia natleniania. Kolejnym powodem intensyfikacji procesu usuwania amoniaku jest jego toksyczność i negatywny wpływ na środowisko wodne.

3. KONTROLA NAPOWIETRZANIA UKŁADÓW SEKWENCYJNO-PRZEPLYWOWYCH

Kontrola napowietrzania technologii sekwencyjno-przepływowych typu BioDenipho była wielokrotnie przedmiotem analiz – szczególnie w przypadku sterowania z wykorzystaniem systemów kontroli on line stężenia amoniaku i azotanów. System BioDenipho jest skomplikowany pod względem kontroli procesu biologicznego usuwania fosforu i azotu. Zmiany faz nityfikacji i denityfikacji są dokonywane w sposób sekwencyjny, okresowo, przez zmianę przepływu przez dwa równolegle napowietrzane zbiorniki (Bundgaard, Anderson, Petersen 1989). Kontrola napowietrzania tej technologii powinna być prowadzona w szczególności w układach sekwencyjno-przepływowych, do usuwania substancji biogenicznych ze ścieków.

Typowy proces technologii BioDenipho składa się z sześciu faz. Zmiana stężenia amoniaku i azotanów w komorach napowietrzania wiąże się ze zmianami fazy, jak to przedstawiono na rysunku 2.

Zmiana cykli w technologii sekwencyjno-przepływowej, z wykorzystaniem pomiarów azotu amonowego i azotu azotanowego, może być prowadzona zgodnie z poniżej przedstawionymi zasadami:

Zasada 1: Przejście z fazy A do fazy B następuje, gdy stężenie amoniaku w reaktorze R1 osiągnie NH_{max} .

Zasada 2: Przejście z fazy B do fazy C następuje, gdy stężenie azotanów w reaktorze R1 osiągnie NO_{min} .

Zasada 3: Przejście z fazy C do fazy D następuje, gdy stężenie amoniaku w reaktorze R2 osiągnie NH_{min} .

W celu wyeliminowania wpływu zakłóceń zewnętrznych (nierównomiernego dopływu, zmiany temperatury i pH itp.), podjęto próbę ustalenia warunków brzegowych (Thornberg, Nielsen, Andersen 1993). Ustalenie tych warunków jest ściśle związane z ustaleniem zmiany faz, na podstawie stężeń NH_{min} i NO_{min} mierzonych on line tak, aby były one zgodne z warunkami panującymi w komorach osadu czynnego. Przykłady kryteriów brzegowych są następujące (Potter, Koopman, Svoeonos 1996):

$$NO_{min} = \alpha NH_4 - N + \beta$$

$$NH_{min} = \gamma NO_3 - N + \delta,$$

gdzie:

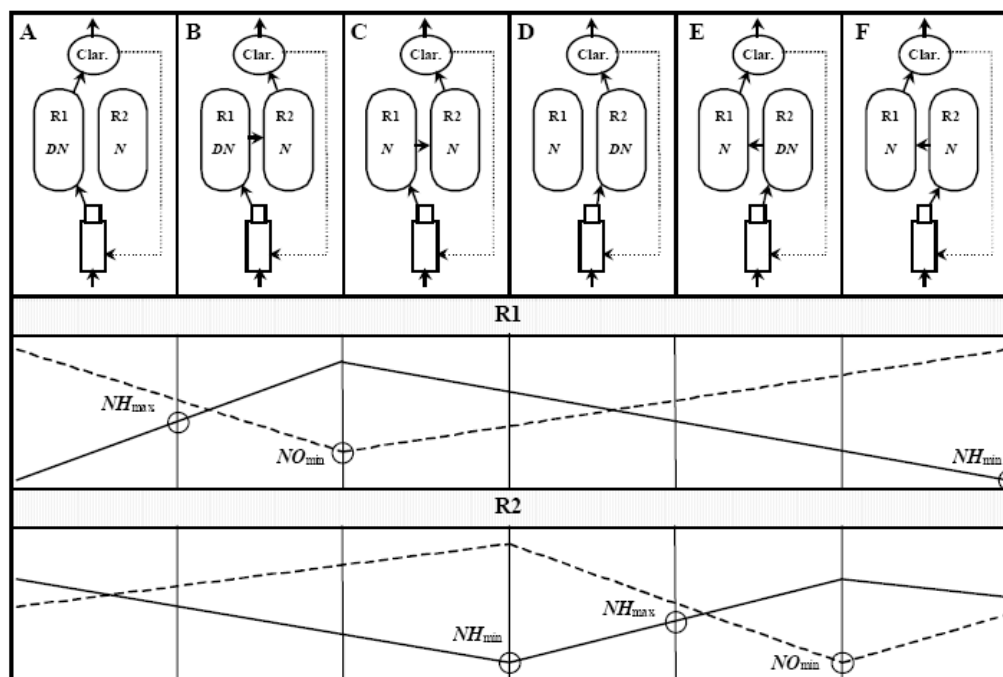
α, β – predefiniowane parametry prędkości procesu nityfikacji,

γ, δ – predefiniowane parametry prędkości procesu denityfikacji,

$NH_4 - N$ – mierzone stężenie azotu amonowego w komorze osadu czynnego,

$NO_3 - N$ – mierzone stężenie azotu azotanowego w komorze osadu czynnego.

Znaczenie kryteriów funkcji można zilustrować następującym przykładem: kiedy reaktor R1 z dużym ładunkiem azotu w fazie B osiągnie wysokie stężenie NO_{min} faza zostanie zakończona wcześniej, aby pozostawić więcej czasu na nityfikowanie amoniaku w komorze R1 (rys. 2), który dopłynął ze ściekami surowymi.



Rys. 2. Schemat przejść pomiędzy fazami w cyklu BioDenipho: A, B, C, D, E, F – kolejne fazy procesu technologicznego, R1, R2 – reaktory biologiczne, DN – denityfikacja, N – nityfikacja, Clar. – osadnik wtórny, NH_{max} – maksymalne stężenie azotu amonowego, NH_{min} – minimalne stężenie azotu amonowego, NO_{min} – minimalne stężenie azotu azotanowego

Fig. 2. The diagram of transitions between BioDenipho cycle phases: A, B, C, D, E, F – the subsequent phases of the process, R1, R2 – biological reactors, DN – denitrification, N – nitrification, Clar. – secondary clarifier, NH_{max} – the maximum concentration of ammonia nitrogen, NH_{min} – the minimum concentration of ammonia nitrogen, NO_{min} – the minimum concentration of nitrate nitrogen

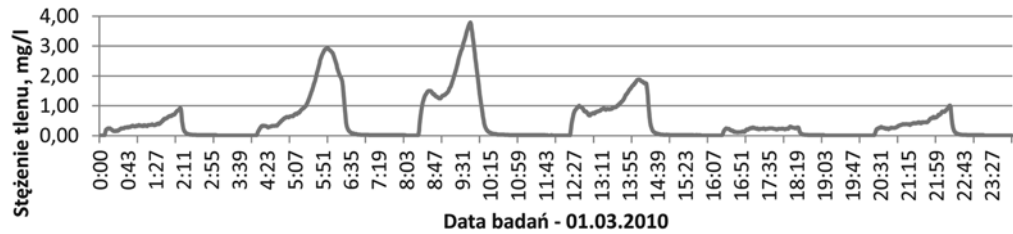
4. KONTROLA NAPOWIETRZANIA SYSTEMÓW Z PREDENITRYFIKACJĄ

Uzyskane wyniki symulacji komputerowych oczyszczalni pracującej w technologii sekwencyjno-przepływowej (BioDenipho) były podstawą do przygotowania algorytmów sterowania i przeprowadzania prób testowych w rzeczywistej skali, tj. w oczyszczalni ścieków w Rybniku (Zdebik, Głodniok, Korczak 2010). Modelowanie i symulacja dotyczyły oczyszczalni pracującej w cyklu czterofazowym, tj. cyklu, w jakim pracuje część biologiczna oczyszczalni. Zastosowanie warunków brzegowych określonych w modelu symulacyjnym w warunkach rzeczywistych wymagało zmiany nastaw technologicznych i wprowadzenia ręcznych korekt.

Układ sekwencyjno-przepływowy wymaga dostarczania tlenu w odpowiednich ilościach, zależnie od ładunku amoniaku, jaki dopłynął do komory. Ładunek amoniaku jest utleniany przez około 90 minut (w cyklu czterofazowym), przez co zapotrzebowanie na tlen zmniejsza się wraz z czasem trwania fazy. W końcowej części fazy (przed rozpoczęciem denitryfikacji) ładunek azotu amonowego zostaje całkowicie utleniony.

Przed opracowaniem algorytmu sterowania ilość dostarczanego tlenu była obliczana za pomocą skomplikowanego algorytmu sterowania pracą przepustnicy, w którym są wykorzystywane dane archiwalne. W fazie nityfikacji nie można było utrzymać zadanego stężenia tlenu rozpuszczonego – około 2 mg/l.

Pomiary stężenia tlenu rozpuszczonego w komorze biologicznej przed wprowadzeniem systemu sterowania przedstawiono na rysunku 3. W czasie rozkładu dobowego zmian stężeń tlenu rozpuszczonego obserwowano strefy niedotlenienia oraz strefy nadmiaru tlenu podczas procesu nityfikacji. Jest to zjawisko niekorzystne podczas usuwania amoniaku ze ścieków. Przedstawiony problem wymagał rozwiązania, które pozwoliłoby na wyeliminowanie stref niedotlenienia i przetlenia, jakie pojawiały się podczas prowadzenia nityfikacji.

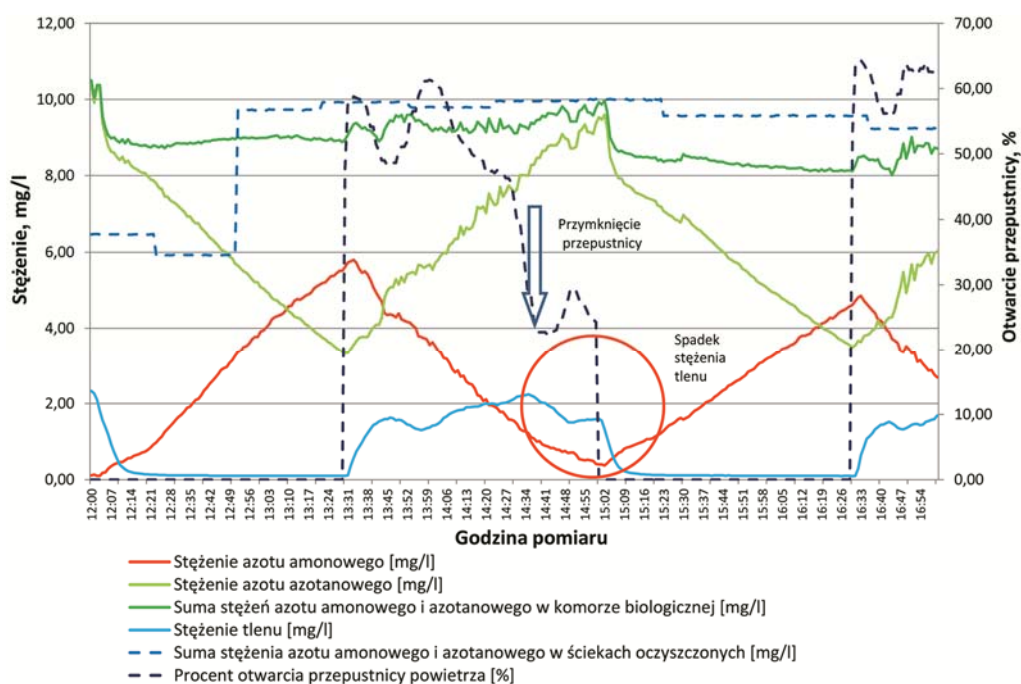


Rys. 3. Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w komorze biologicznej przed wprowadzeniem sterowania – wyniki pomiarów on line z dnia 1.03.2010 r.

Fig. 3. Changes in the concentration of dissolved oxygen in the biological chamber before the control introduction – the on line results of measurements dated 1/03/2010

Przed przystąpieniem do badań, wykonano chwilowe próby technologiczne w celu określenia czasu trwania zmniejszania się stężenia tlenu w komorach. Wskazały one, że na 30 minut przed zakończeniem nityfikacji, można obserwować zmniejszenie stężenia tlenu. Następnie przez pięć dni prowadzono ciągłe testy technologiczne.

Wyniki wprowadzonych zmian przedstawiono na rysunku 4. Po wydaniu polecenia zmiany stężenia tlenu z 2 do 1 mg O₂/l następowało przymknięcie przepustnicy (kolor niebieski) do 20%. Spadek stężenia tlenu rozpuszczonego następował po paru minutach. Zwłoka była spowodowana pracą przepustnicy – początkowo przymykaniem, a następnie otwieraniem.



Rys. 4. Zmiana stężenia tlenu w czasie prowadzenia testów

Fig. 4. Change of oxygen concentration during the conducted tests

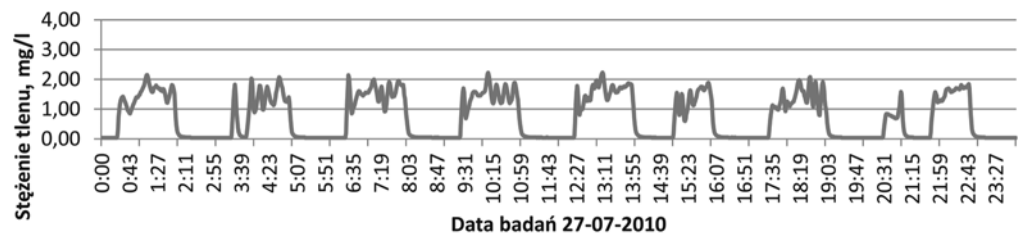
W czasie prowadzenia ciągłych badań technologicznych nie zaobserwowano negatywnego wpływu zmniejszenia stężenia tlenu z 2 do 1 mg/l w końcowych 30 minutach nityfikacji. Prędkość usuwania azotu amonowego nie uległa zmianie. Ze względu na wprowadzane zmiany w sterowaniu stężeniem tlenu w komorach, obserwowano częste włączanie zaworu bezpieczeństwa.

Przeprowadzone badania były podstawą do opracowania modelu pracy systemu napowietrzania, który był poddany symulacjom komputerowym (Zdebik, Głodniok, Korczak 2010). W dalszej kolejności opracowano algorytm sterowania pracą dmuchaw, który zawierał warunki brzegowe przemykania lub otwierania przepustnic na rurociągach dostarczających powietrze do komór w zależności od aktualnych pomiarów on line tlenu rozpuszczonego, mierzonych za pomocą sond zanurzonych w komorach biologicznych.

Realizacja przedstawionego problemu badawczego doprowadziła do zmiany sterowania pracą przepustnic, przez wprowadzenie prostego układu sterowania z wykorzystaniem wyników pomiarów sond tlenowych bez wprowadzania korekty nastaw w czasie rzeczywistym.

Przygotowany program został wprowadzony do systemu SCADA sterującego pracą oczyszczalni. Wyniki pracy układu sterującego kontrolującego stężenia tlenu rozpuszczonego w komorach osadu czynnego, z uwzględnieniem pomiarów *in situ*, jak i wartości zadane przez dyspozytora, przedstawiono na rysunku 5. Wprowadzenie

sterowania pozwoliło na wyeliminowanie stref niedotlenienia i przetlenienia ścieków podczas procesu nityfikacji.



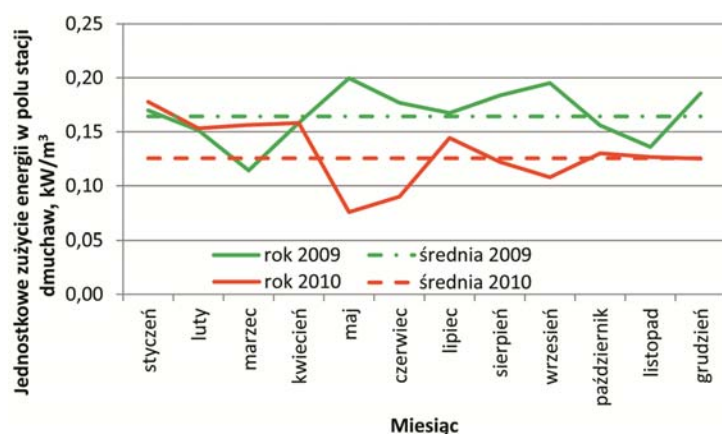
Rys. 5. Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w komorze biologicznej po wprowadzeniu systemu sterowania – wyniki pomiarów on line z dnia 27.07.2010 r.

Fig. 5. Changes in the concentration of dissolved oxygen in the biological chamber after the control introduction – the on line results of measurements dated 27/07/2010

Potwierdzeniem tych zależności są badania wykonane urządzeniem Bioscope. Monitorowana wartość OUR (*oxygen uptake rate* – prędkość poboru tlenu), wynosząca 24–30 mg O₂/l/h przez całą fazę nityfikacji, świadczyła o prawidłowym przebiegu procesu usuwania amoniaku (Głodniok, Zdebik 2010). Spadek wartości OUR poniżej 15 mg O₂/l/h w końcowej fazie nityfikacji świadczył o usunięciu ładunku amoniaku w komorze biologicznej. W takiej sytuacji utrzymanie stężenia tlenu wynoszącego 2 mg/l lub możliwość sterowania jego zmniejszeniem pozwala na efektywne wykorzystanie dmuchaw.

W czasie prowadzenia badań można było zaobserwować, że w okresach nocnych stężenie azotu azotanowego, który powstał w wyniku utleniania azotu amonowego ze ścieków dopływających w godzinach południowych i popołudniowych dnia poprzedniego, ulegało znacznemu obniżeniu. Przygotowanie części biologicznej oczyszczalni w godzinach nocnych i rannych (przy zmniejszonym dopływie ścieków oraz mniejszym ładunku) na przyjęcie „szczytu porannego ładunku azotu amonowego”, który dopływa do komór biologicznych około godz. 11.00–12.00, po uwzględnieniu retencji w osadnikach wstępnych, powodowało obniżenie stężenia azotu azotanowego, który jest efektem jego utleniania. Rozwiązanie takie może być wykorzystane do przygotowania testowego algorytmu sterowania pracą komór biologicznych, który może być zastosowany w układzie automatyki.

Efektom zastosowania systemu sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w komorach jest zmniejszenie zużycia energii elektrycznej w stacji dmuchaw. W 2009 roku jednostkowe zużycie energii elektrycznej w stacji dmuchaw wynosiło około 0,17 kW/m³, natomiast w 2010 roku, spadło do około 0,13 kW/m³, czyli o około 30%. Na rysunku 6 przedstawiono jednostkowe zużycie energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach 2009 i 2010 roku. W 2010 roku od lipca, jednostkowe zużycie energii elektrycznej w polu stacji dmuchaw charakteryzowało się małym wahaniami w stosunku do wartości średniorocznej.



Rys. 6. Jednostkowe zużycie energii elektrycznej w stacji dmuchaw w 2009 i 2010 roku

Fig. 6. The unit electricity consumption of blowers station in 2009 and 2010

5. PODSUMOWANIE

W czasie prowadzenia badań polegających na modyfikacji istniejącego cyklu technologicznego oczyszczalni przy zmniejszaniu stężenia tlenu w komorach oraz zmianie czasu trwania faz nityfikacji i denityfikacji stwierdzono, że wprowadzanie zmian w układzie sterowania przepustnicami powietrza doprowadzanego do komór biologicznych, wpływa na poprawę procesu nityfikacji.

Przygotowany, na podstawie wykonanych badań, algorytm sterowania otwieraniem/zamykaniem przepustnic powietrza został wprowadzony do systemu sterowania pracą części biologicznej oczyszczalni.

Wprowadzony system sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w komorach osadu czynnego, wykorzystujący pomiary on line stężenia tlenu rozpuszczonego w komorach, pozwolił na uwzględnienie ich w procesie technologicznym, czego efektem było utrzymanie stałej wartości tlenu rozpuszczonego od rozpoczęcia do zakończenia fazy nityfikacji. Badania prędkości poboru tlenu (OUR) wykonane *in situ* po wprowadzeniu zmian w systemie sterowania, wykazały, że zastosowane rozwiązanie nie wpłynęło negatywnie na pracę osadu czynnego w fazie nityfikacji.

W wyniku wprowadzenia tego systemu odnotowano zmniejszenie zużycia energii elektrycznej w stacji dmuchaw.

Literatura

1. Bakmer P., Ekfjorden L., Lumely D., Mattsson A. (1998): Upgrading for Nitrogen Removal Under Service Site Restriction. *Wat. Sci. Tech.* 37(9), s. 185–192.
2. Bundgaard E., Anderson K., Petersen G. (1989): Bio-Denitro and Bio-Denipho System – Experiences and Advanced Model Development: The Danish System for Biological N and P Removal. *Wat. Sci. Tech.* 21, s. 1727–1730.
3. Głodniok M., Zdebik D. (2010): Wykorzystanie analiz respirometrycznych do kontroli procesu oczyszczania ścieków przemysłowych. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 4, s. 5–16.

4. Henze M., Grady C.P.L Jr, Gujer W., Marais G.v.R, Matsuo T. (1987): Activated Sludge Model No. 1. London, IWAQ Scientific and Technical Report No. 1.
5. Holmberg U., Olsson G., Andersson B. (1989): Simultaneous DO control and Respiration Estimation. *Wat. Sci. Tech.* 21, s. 1185–1195.
6. Ko K., Meinnis B., Goodwin G. (1982): Adaptive Control and Identification of the Dissolved Oxygen Process. *Automatica* 18 (6), s. 727–730.
7. Marsili-Libelli S. (1989): Modelling, Identification and Control of the Activated Sludge Process. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 38, s. 89–148.
8. Marsman E., Roeleveld P., Rensink J. (2007): High Nutrient Removal in the Three-Sludge Sewage Treatment System: Results and Economic Evaluation. *Wat. Sci. Tech.* 35 (10), s. 129–136.
9. Ollson G. (1976): State of the Art in Sewage Treatment Plant Control. *AIChE Symposium Series* 72(159), s. 52–76.
10. Olsson G., Rundqwist L., Eriksson L., Hall L. (1985): Self-tuning Control of the Dissolved Oxygen Concentration in Activated Sludge System, in *Advances in Water Pollution Control*. IAWPRC Workshop. Pergamon Press, Huston, Texas, USA, s. 473–480.
11. Potter T., Koopman B., Svoeonos A. (1996): Optimisation of Periodic Biological Process for Nitrogen Removal from Wastewater. *Wat. Res.* 30(1), s. 142–152.
12. Thornberg D., Nielsen M., Andersen K. (1993): Nutrient Removal: on-line Measurements and Control Strategies. *Wat. Sci. Tech.* 28(11–12), s. 549–560.
13. Zdebik D., Głodniok M. (2010): Wyniki badań podatności ścieków na rozkład biologiczny – frakcje ChZT na przykładzie oczyszczalni ścieków w Rybniku. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 4, s. 97–114.
14. Zdebik D., Głodniok M., Korczak K. (2010): Modelowanie usuwania biogenów w procesie biologicznego oczyszczania ścieków w technologii sekwencyjno-przepływowej. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 2, s. 97–112.

Artykuł opracowano w ramach projektu celowego nr 6 ZR7 2008C/07051 pn. „Zwiększenie redukcji biogenów przez optymalizację procesu biologicznego oczyszczania ścieków w oczyszczalni ścieków Rybnik-Orzepowice”.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Barbara Białecka