

Łukasz GUZ¹, Grzegorz ŁAGÓD¹, Katarzyna JAROMIN-GLEŃ² i Henryk SOBCZUK¹

WYKRYWANIE ZAKŁÓCEŃ PROCESU OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW W BIOREAKTORZE PORCJOWYM Z WYKORZYSTANIEM E-NOSA

DETECTION OF WASTEWATER TREATMENT PROCESS DISTURBANCES IN BATCH BIOREACTOR USING E-NOSE

Abstrakt: Celem pracy jest określenie możliwości wykrywania zakłóceń w przebiegu procesu oczyszczania ścieków prowadzonych za pomocą reaktora typu SBR przy zastosowaniu elektronicznego nosa skonstruowanego z wykorzystaniem matrycy nieselektywnych rezystancyjnych czujników gazu. Pomiarów dokonywano podczas procesu oczyszczania ścieków miejskich, który przeprowadzano w cyklu 12-godzinnym w bioreaktorze laboratoryjnym. Wykonano ciągłe pomiary powietrza pobieranego ponad zwierciadłem ścieków w reaktorze SBR za pomocą matrycy czujnikowej opartej na rezystancyjnych czujnikach gazu typu MOS podczas stabilnej pracy systemu oraz symulacji awarii procesu napowietrzania. Do interpretacji wyników wykorzystano analizę PCA. Przeprowadzone badania laboratoryjne wskazują, że, wykorzystując matrycę czujnikową, można wnioskować o przebiegu procesu oczyszczania ścieków w reaktorze i natychmiast uzyskiwać informacje o stanach odbiegających od normy.

Słowa kluczowe: matryca czujników gazu, e-nos, MOS, SBR, oczyszczanie ścieków

Do oceny procesu oczyszczania ścieków w bioreaktorach z osadem czynnym wykorzystywane są głównie parametry fizykochemiczne, takie jak: biologiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT), chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), odczyn (pH), szybkość zużycia tlenu (OUR), zawartość zawiesin ogólnych (Z_{og}), zawartość ogólnego węgla organicznego (OWO), zawartość związków fosforu i azotu [1]. Metody te są dość dobrze poznane i szeroko stosowane oraz pozwalają kontrolować i precyzyjnie sterować procesem oczyszczania w celu spełnienia wymagań normatywnych [2]. Wadą wspomnianych metod jest to, iż wykorzystanie ich do ciągłego monitoringu przebiegu procesów oczyszczania oraz kontroli parametrów oczyszczonych ścieków jest dosyć trudne i kosztowne ze względu na złożoność prowadzonych procedur i czasochłonność ich wykonania. Niektóre badania trwają kilka dni i istnieje wiele niedogodności związanych z otrzymaniem odtwarzalnych wyników, np. wykonywanie analizy BZT₅. Generalnie techniki do pomiaru *on-line* posiadają ciągle ograniczone zastosowanie ze względu na krótką żywotność i awaryjność urządzeń pomiarowych bądź ich znaczne skomplikowanie.

Do monitoringu jakości ścieków na podstawie analizy powietrza pobranego bezpośrednio nad ich powierzchnią wykorzystywane mogą być systemy wieloczujnikowe [3]. Powyższe urządzenia sprzężone z komputerowym systemem przetwarzania sygnałów oraz interpretacji wyników nazywane są elektronicznym nosem. Z zasady działania systemów wieloczujnikowych wynika, że nie jest istotny rozdział próbki gazowej na

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 47 84, email: l.guz@pollub.pl, l.lagod@pollub.pl, h.sobczuk@pollub.pl

² Instytut Agrofizyki, Polska Akademia Nauk, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. 81 744 50 61, email: k.m.jaromin@gmail.com

* Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'13, Jarnołtówek, 23-26.10.2013

poszczególne składniki chemiczne [4]. Ze względu na częściową selektywność czujników wchodzących w skład matrycy można rejestrować i rozróżniać szerokie spektrum profili zanieczyszczonego powietrza emitowanego podczas procesu oczyszczania ścieków. Z analizy wyników uzyskanych podczas badań laboratoryjnych prowadzonych z użyciem bioreaktora typu SBR wynika iż, wykorzystując metody analizy sygnałów wielowymiarowych, każdy profil, rozumiany jako kombinacja sygnałów z czujników, można przyporządkować do określonej klasy, reprezentującej poszczególne fazy pracy reaktora.

Na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych można wnioskować, że za pomocą urządzeń wieloczujnikowych możliwe jest rozpoznawanie ścieków ze względu na stopień oczyszczenia (fazę oczyszczania, w której się aktualnie znajdują) [5, 6]. Podjęto również próby korelacji wyników z systemów wieloczujnikowych z podstawowymi parametrami fizykochemicznymi określającymi jakość ścieków, takimi jak: BZT₅ [6, 7], siarkowódor [8], ChZT i Z_{og} [9] czy lotne związki organiczne [10]. Zadowolające wyniki uzyskano również odnośnie do stężenia zapachowego [8]. Systemy wieloczujnikowe wykorzystane były ponadto do wykrywania przypadkowych zrzutów nieswoistych ścieków do sieci kanalizacyjnych [11]. Najczęściej wykorzystywanym narzędziem do interpretacji danych wielowymiarowych były analiza PCA oraz sieci neuronowe.

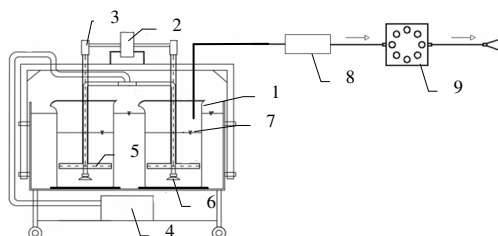
Z uwagi na powyższe przesłanki celem prezentowanych badań było rozwinięcie techniki wczesnego ostrzegania przed nienaturalnymi stanami świadczącymi o zakłóceniach procesów oczyszczania ścieków w reaktorze SBR przy użyciu matrycy z rezystancyjnymi czujnikami gazów typu MOS do pomiarów oraz techniki PCA do analizy uzyskiwanych danych.

Materiały i metody

Schemat stanowiska badawczego z bioreaktorem pokazano na rysunku 1. Jest to laboratoryjny reaktor SBR oczyszczający ścieki metodą osadu czynnego, pracujący podczas opisywanego eksperymentu w cyklu 12-godzinny, połączony z wieloczujnikowym układem pomiarowym. Bioreaktor umożliwia redukcję stężenia substancji organicznych i biogenów (związki węgla, azotu i fosforu) podczas aktywnej fazy oczyszczania obejmującej mieszanie i napowietrzanie. Ścieki oczyszczane w bioreaktorze zostały pobrane z osadnika wstępnego, miejskiej oczyszczalni ścieków Hajdów (Lublin), gdzie dzienny strumień ścieków Q_d wynosi średnio około 60 000 m³/d.

Wykonywano pomiar fazy gazowej pobieranej nad powierzchnią ścieków przy użyciu matrycy składającej się z ośmiu czujników typu MOS firmy Figaro serii TGS 2600 oraz czujnika temperatury (Maxim-Dallas DS18B20) i czujnika wilgotności względnej (Honeywell HIH-4000) [12]. Pomiar prowadzono ciągle przez 60 dni z częstotliwością odczytów co 1 s, obejmował on takie fazy procesu, jak: napełnianie, mieszanie i napowietrzanie oraz sedymentację i dekantację. Czujniki przepłukiwane były czystym powietrzem podczas fazy dekantacji i napełniania. Przepływ strumienia próbek był stały i wynosił 200 cm³/min. Z powodu obecności wilgoci próbki osuszane były za pomocą membranowego osuszacza DM-110-24 Perma Pure z rurką nafionową oraz granulowanym żelazem krzemionkowym. Podczas pomiarów temperatura gazów wewnątrz komory czujnikowej e-nosa wynosiła średnio 35°C (±2°C), a wilgotność względna 20% (±5%).

Podwyższenie temperatury badanych gazów spowodowane było poprzez grzałki wbudowane w czujniki typu MOS, co dodatkowo pomogło zniwelować niebezpieczeństwo wykraplania się pary z badanych gazów.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego bioreaktora SBR i sposobu próbkowania: 1 - komora bioreaktora SBR; 2 - silnik elektryczny; 3 - przekładnia; 4 - sprężarka membranowa; 5 - mieszacz; 6 - dyfuzor; 7 - poziom ścieków; 8 - osuszacz nafonowy; 9 - matryca czujnikowa

Fig. 1. Outline of laboratory SBR bioreactor and sampling method: 1 - SBR bioreaction chamber; 2 - electric motor; 3 - transmission; 4 - membrane blower; 5 - stirrer; 6 - diffuser; 7 - level of sewage; 8 - desiccant-membrane dryer; 9 - gas sensors array

Do analizy wyników poszczególnych faz pracy reaktora SBR wykorzystano analizę głównych składowych PCA, która służy do redukcji liczby wymiarów zbioru danych i wyszukiwania zależności ukrytych z powodu nadmiaru informacji. W wielu przypadkach wystarczająca jest redukcja do 2 lub 3 nieskorelowanych czynników, które często zawierają więcej niż 90% informacji o pierwotnym zbiorze danych [13]. Do analizy statystycznej - analizy głównych składowych (PCA) wykorzystany został program Statistica 10.

Wyniki i ich dyskusja

Nieprzetworzone sygnały z matrycy czujników, uzyskane podczas pomiarów, pokazano na rysunku 2. Zauważalne są powtarzające się cykle 12-godzinnej pracy reaktora SBR. Podczas fazy dekantacji i doprowadzania surowych ścieków czujniki były przepłukiwane czystym powietrzem przez okres 30 min. Ich rezystancja wykazywała wtedy najwyższe wartości. Po dodaniu ścieków i zamknięciu bioreaktora sonda umieszczana była ponownie

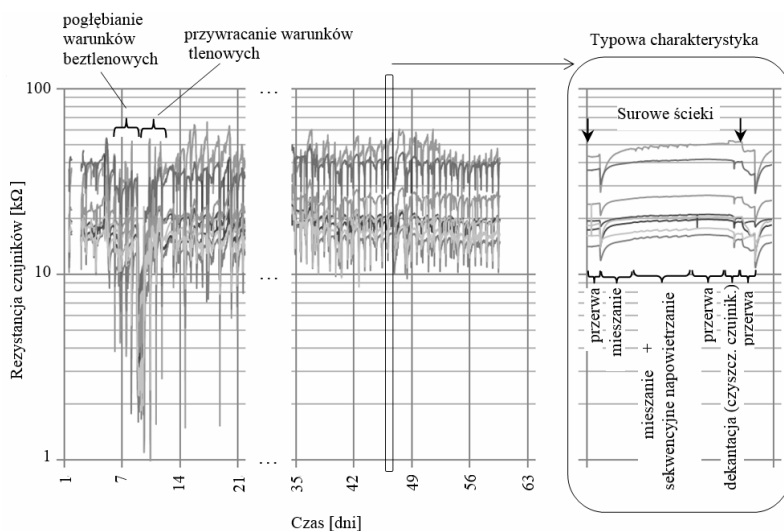
w komorze SBR i uruchamiano pobór powietrza z nad powierzchni ścieków. Następowal wtedy spadek rezystancji czujników, wskutek większego zanieczyszczenia powietrza pobranego ponad powierzchnią ścieków niż powietrza przepływającego. Jako pierwsza faza cyklu pracy reaktora realizowane było 2-godzinne mieszanie. W początkowym momencie zmieszania wsadu komór (osadu czynnego, wody nadosadowej oraz surowych ścieków) następował nagły wzrost ilości gazowych zanieczyszczeń w powietrzu i rezystancja czujników obniżała się gwałtownie. Kolejną fazą było sekwencyjne napowietrzanie reaktora przez okres 7 godzin, a następnie 2-godzinna sedimentacja. Pomimo iż ścieki surowe charakteryzowały się stosunkowo dużą zmiennością w składzie fizykochemicznym, ciągły monitoring wykazał wiele powtarzających się cykli, których charakter jest zbliżony do poprawnej pracy bioreaktora. Wszelkie odstępstwa od typowych charakterystyk świadczą o zmianie w pracy bioreaktora (ewentualnej awarii któregoś z elementów

reaktora) lub o spadku skuteczności oczyszczania ścieków powodowanej na przykład dopływem substancji trujących dla osadu czynnego.

W początkowym okresie badań, z którego wyniki uwidoczniło na rysunku 2, w ciągu trzech kolejnych dni przeprowadzono eksperymentalną awarię reaktora SBR. Awaria ta polegała na wyłączeniu systemu napowietrzania i spowodowała powstanie warunków sprzyjających rozwojowi bakterii beztlenowych. Zauważalne jest w tym czasie obniżenie wartości rezystancji wszystkich czujników gazu średnio o 33,4% w stosunku do ich normalnego stanu, co zostało oznaczone jako „pogłębienie warunków beztlenowych”. Następnym etapem było ponowne uruchomienie systemów napowietrzania. W momencie wzburzenia wsadu za pomocą wprowadzonego powietrza nastąpiło wzmożone uwalnianie uciążliwych zapachowo gazów. W wyniku znacznego zanieczyszczenia powietrza nad powierzchnią ścieków rezystancja czujników obniżyła się średnio o 77,3% w stosunku do ich normalnego (poza awaryjnego) stanu. W kolejnych dniach następował sukcesywny powrót warunków do panujących w normalnym trybie pracy reaktora.

Powyższe dwa nienaturalne stany można łatwo odróżnić od pozostałych typowych stanów pracy reaktora przedstawionych w prawej części rysunku 2. Potwierdza to możliwość wykorzystania systemów wieloczujnikowych do ciągłego monitoringu stanu reaktora, dając natychmiastowy sygnał o niewłaściwej jego pracy. Ze względu na to, że czujniki nie są zanurzone w agresywnym środowisku wodnym, ich trwałość jest zwiększona w stosunku do czujników innych immersyjnych metod.

Do dalszej analizy została wykorzystana rezystancja względna R_S/R_O sygnałów matrycy czujnikowej, gdzie R_S to rezystancja czujnika [k Ω] podczas pomiaru fazy gazowej nad ściekami, zaś R_O - rezystancja czujnika [k Ω] w atmosferze czystego powietrza.

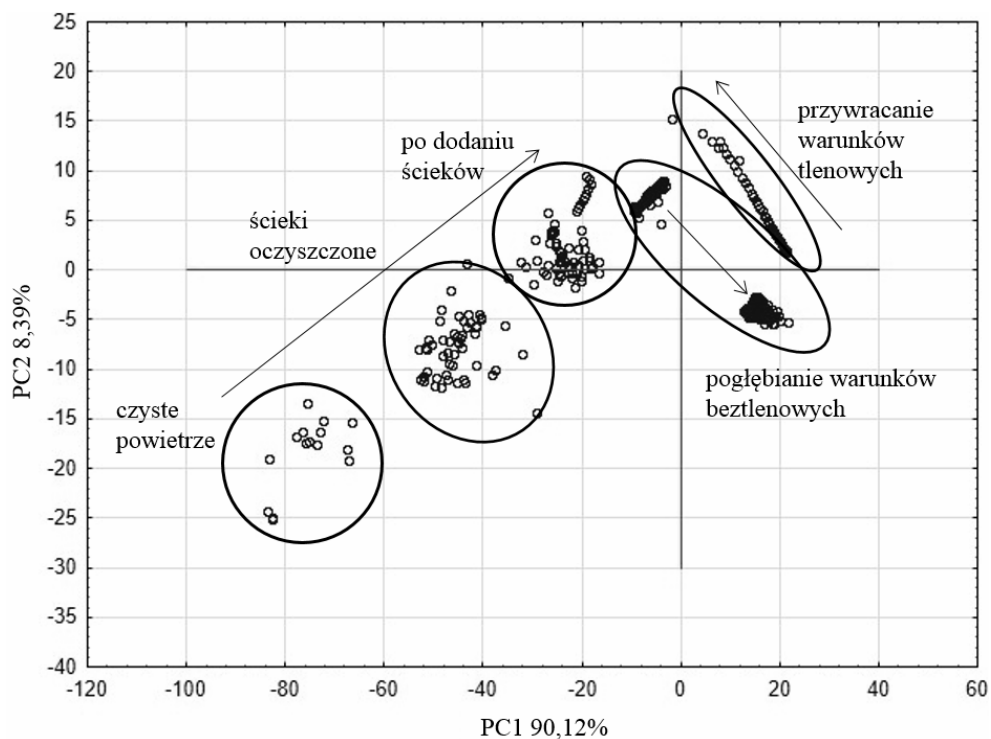


Rys. 2. Nieprzetworzona charakterystyka z matrycy czujnikowej zarejestrowana podczas ciągłego pomiaru. Po prawej: przedstawiona typowa powtarzalna charakterystyka z opisem procesów

Fig. 2. Unprocessed output from gas sensor array recorded during continuous monitoring. On the right: featured typical repetitive sensor output with process description

Za pomocą analizy PCA zredukowano 8-wymiarowy zbiór danych (liczba czujników) do dwóch nowych nieskorelowanych wymiarów, najlepiej odzwierciedlających zmienności w zbiorze danych. Wyniki analizy dla macierzy czujnikowej przedstawiono na rysunku 3. Czynniki PC1 zawiera 90,12% informacji o pierwotnym zbiorze danych i tylko on może zostać wzięty pod uwagę podczas interpretacji wyników. Dla zwiększenia czytelności rysunku uwzględniono również czynnik PC2 (8,39%). Wyróżnione etapy pracy oraz odbiegające od normy stany reaktora SBR można podzielić na 5 klas: (i) przywracanie warunków tlenowych, (ii) pogłębianie warunków beztlenowych, (iii) po dodaniu ścieków, (iv) ścieki oczyszczone i (v) czyste powietrze. Zmiana cech fizykochemicznych powietrza w komorze SBR jest proporcjonalna do osi odciętych PC1. Z lewej strony wykresu znajdują się punkty reprezentujące czyste powietrze. W miarę zwiększania stopnia zanieczyszczenia ścieków (wzrostu stężenia substancji lotnych w powietrzu) charakterystyka przesuwa się w prawą stronę. Przywracanie warunków tlenowych odzwierciedla się na wykresie poprzez cofnięcie charakterystyki w lewą stronę.

Rozpoznanie stanu odpowiadającego napowietrzaniu jest bardzo trudne, gdyż reprezentujące je punkty pokrywają się ze skupiskiem punktów odpowiadającym ściekom oczyszczonym. Punkty odpowiadające mieszanin pokrywają się częściowo ze stanami „po dodaniu ścieków” oraz „ścieki oczyszczone”.



Rys. 3. Analiza PCA różnych stanów reaktora SBR

Fig. 3. PCA analysis of different stages of SBR reactor

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują na to, iż do monitoringu procesów oczyszczania ścieków komunalnych w reaktorze SBR może zostać wykorzystana matryca czujników gazu typu MOS. Opisana metoda umożliwia identyfikację poszczególnych etapów pracy bioreaktora, gdzie z dużym prawdopodobieństwem można identyfikować charakterystyczne stany i etapy działania reaktora SBR. W pracy wyodrębniono stany ogólnie określone jako: (i) przywracanie warunków tlenowych, (ii) pogłębianie warunków beztlenowych, (iii) po dodaniu ścieków, (iv) ścieki oczyszczone i (v) czyste powietrze.

Systemy wieloczujnikowe mogą zostać wykorzystane do ciągłego monitoringu funkcjonowania bioreaktora typu SBR, dając natychmiastowy sygnał o niewłaściwej jego pracy. Ze względu na to, że czujniki nie są zanurzone w agresywnym środowisku wodnym, ich trwałość jest zwiększona w stosunku do czujników stosowanych w przypadku innych metod immersyjnych.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2012-2014 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant”.

Literatura

- [1] Thomas O, Theraulaz F, Cerda V, Constant D, Quevauviller P. Wastewater quality monitoring. *Trends Anal Chem.* 1997;16:419-424.
- [2] Bourgeois W, Gardey G, Servieres M, Stuetz RM. A chemical sensor array based system for protecting wastewater treatment plants. *Sens Act B.* 2003;91:109-116. DOI: 10.1016/S0925-4005(03)00074-1.
- [3] Guz Ł, Sobczuk H, Suchorab Z. Pomiar odorów za pomocą przenośnego miernika z matrycą półprzewodnikowych czujników gazu. *Przem Chem.* 2010;89(4):378-381.
- [4] Gardner JW, Bartlett PN. A brief history of electronic nose. *Sens Act B.* 1993;18:211-220.
- [5] Stuetz RM, Fenner RA, Engin G. Characterisation of wastewater using an electronic nose. *Water Res.* 1999;33(2):442-452. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00245-0.
- [6] Capelli L, Sironi S, Céntola P, Del Rosso R, Grande MI. Electronic noses for the continuous monitoring of odours from a wastewater treatment plant at specific receptors: Focus on training methods. *Sens Act B.* 2008;131:53-62. DOI: 10.1016/j.snb.2007.12.004.
- [7] Onkal-Engina G, Demir I, Engin SN. Determination of the relationship between sewage odour and BOD by neural networks. *Environ Modell Softw.* 2005;20:843-850. DOI: 10.1016/j.envsoft.2004.04.012.
- [8] Stuetz RM, Fenner RA, Engin G. Assessment of odours from sewage treatment works by an electronic nose, H₂S analysis and olfactometry. *Water Res.* 1999;33(2):453-461. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00246-2.
- [9] Dewettinck T, Van Hege K, Verstraete W. The electronic nose as a rapid sensor for volatile compounds in treated domestic wastewater. *Water Res.* 2001;35(10):75-83. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00530-3.
- [10] Nake A, Dubreuil B, Raynaud C, Talou T. Outdoor in situ monitoring of volatile emissions from wastewater treatment plants with two portable technologies of electronic noses. *Sens Act B.* 2005;106:36-39. DOI: 10.1016/j.snb.2004.05.034.
- [11] Bourgeois W, Stuetz RM. Use of a chemical sensor array for detecting pollutants in domestic wastewater. *Water Res.* 2002;36:4505-4512. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00183-5.
- [12] TGS Figaro 2600 series datasheet, <http://www.figarosensor.com>, 2013.
- [13] Krzanowski WJ. *Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective.* New York: Oxford University Press; 2000.

DETECTION OF WASTEWATER TREATMENT PROCESS DISTURBANCES IN BATCH BIOREACTOR USING E-NOSE

¹ Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

² Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin

Abstract: The objective of this article is to determine the possibility of biological process disturbances detect in SBR reactor using developed electronic nose device with application of non-selective gas sensor array. The SBR reactor allows to reduce organic carbon and nutrients concentration level. Measurements were performed during wastewater treatment, which was conducted in 12 hours working cycle. Continuous headspace analysis using the sensor array based on a resistive gas sensors MOS type was performed. To interpret the results, the PCA analysis was applied. Conducted studies have shown that using a sensor array it is possible to inform about abnormal conditions meaning disturbances of the process.

Keywords: gas sensors array, e-nose, MOS, SBR, wastewater purification

