

Ocena efektywności technologicznej biologicznego oczyszczania gazów pochodzących z przetwarzania odpadów komunalnych

Assessment of the technological efficiency of biological treatment of gases from the municipal solid waste treatment plant

Piotr Manczarski, Krystyna Lelicińska-Serafin, Anna Rolewicz-Kalińska^{*)}

Słowa kluczowe: *biofiltracja, materiał wypełniający, efektywność oczyszczania gazów, odpady komunalne*

Streszczenie

Celem badań była diagnoza możliwości zmian eksploatacyjnych w istniejącym biofiltrze na jednej z eksploatowanych w kraju instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych. Zakres badań obejmował badania technologiczne wypełnienia biofiltru, badania gazów poddawanych oczyszczaniu i gazów oczyszczonych oraz ocenę parametrów eksploatacyjnych instalacji. Badany biofiltr charakteryzuje się prawidłowymi parametrami w zakresie obciążenia powierzchniowego, czasu kontaktu gazów z warstwą wypełnienia oraz podstawowymi parametrami gazów procesowych kierowanych do oczyszczania. Efektywność biofiltracji w zakresie usuwania zanieczyszczenia wodącego jest jednak niezadowalająca. Nieprawidłowości wynikają przede wszystkim z niewłaściwie dobranego materiału wypełniającego i nieprawidłowej eksploatacji biofiltru. Wskazuje się na konieczność przeprowadzenia niezbędnych zmian eksploatacyjnych.

Keywords: *biofiltration, filter bed, purification efficiency, Municipal Solid Waste*

Abstract

The aim of the research was to identify the possibility of operational changes in the existing biofilter in the mechanical-biological treatment plant dedicated for municipal solid waste. The scope of the research included technological analysis of the biofilter bed, analysis of raw and purified gases, and the assessment of operating parameters of the installation. The biofilter was characterized by the correct parameters of surface load, contact time of gas with the filling bed and the basic parameters of the raw gases. However, the efficiency removal of the lead pollutant was unsatisfactory. It resulted mainly from improperly chosen filling material and insufficient use of the biofilter. The necessity of operational changes was indicated.

Wstęp

Gazy procesowe pochodzące z przetwarzania odpadów komunalnych, zawierają liczne związki organiczne (lotne kwasy tłuszczowe, aldehydy, ketony, alkohole) oraz nieorganiczne (siarkowodor, amoniak). Są uciążliwe dla otoczenia ze względu na intensywny i przykry zapach, mogą także szkodliwie oddziaływać na zdrowie człowieka i na środowisko. Ich emisja do atmosfery powoduje postępujące pogarszanie się jakości powietrza atmosferycznego i stanowi realne zagrożenie zdrowia i życia. Powstawanie i rozprzestrzenianie się zapachu w procesach mechaniczno-biologicznego przetwarzania (MBP) zależy przede wszystkim od rodzaju odpadów, zastosowanej technologii, w tym rodzaju prowadzonego procesu w części biologicznej (tlenowy/beztlenowy), stopnia hermetyzacji, sposobu eksploatacji instalacji, możliwości ujęcia i oczyszczenia emitowanych gazów procesowych. Skład gazów pochodzących z zakładów MBP jest związany z etapem przetwarzania (część mechaniczna/biologiczna) oraz z fazą procesu biochemicznego [10].

Wśród możliwości ograniczających uciążliwość zapachową zakładów MBP odpadów należy wymienić przede wszystkim wy-

korzystywanie metod biologicznego oczyszczania emitowanych gazów. Metody te, w przeciwieństwie do technologii fizyczno-chemicznych, mają własność całkowitej degradacji zanieczyszczeń do postaci nieszkodliwej lub o znikomej szkodliwości oraz możliwość skutecznego oczyszczania gazów, bez tworzenia uciążliwych odpadów. Wykorzystują naturalny potencjał mikroorganizmów do rozkładu zanieczyszczeń. W porównaniu z innymi metodami mają zaletę usuwania wielu bardzo różnorodnych związków, nawet jeśli występują one w jednej mieszaninie gazów [1].

Biologiczne oczyszczanie gazów może być realizowane za pomocą biofiltrów, biopłuczek oraz złóż biologicznych. Te trzy technologie biologicznego oczyszczania gazów są najpowszechniej wykorzystywane w pełnej skali technicznej, chociaż proponowane są również rzadziej stosowane rozwiązania, np. filtry membranowe, bioreaktory z dwiema fazami ciekłymi, bioreaktory obrotowe i inne [4].

Często stosowaną metodą oczyszczania gazów, pochodzących z biologicznego przetwarzania odpadów jest biofiltracja, ze względu m.in. na większą różnorodność mikroorganizmów występujących w materiale wypełniającym, w porównaniu do innych metod biologicznych, możliwość usuwania z gazów również związków, które są słabo rozpuszczalne w wodzie oraz zwykle prostszą i tańszą

^{*)} dr inż. Piotr Manczarski (ORCID 0000-0003-4067-8556), dr inż. Krystyna Lelicińska-Serafin (ORCID 0000-0002-7175-8068), dr inż. Anna Rolewicz-Kalińska (ORCID 0000-0002-5266-9086) – Zespół Gospodarki Odpadami, Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, tel.: 22 234 5305, e-mail: Piotr.Manczarski@pw.edu.pl

eksploatację [1]. Biofiltry mogą być stosowane do usuwania zarówno związków organicznych (alkohole, ketony, alkan, pochodne benzenu, chlorowcopochodne, zanieczyszczenia alifatyczne i aromatyczne, aldehydy, kwasy organiczne, aminy, glikole, octan etylu, octan butylu, izobutanol, fenol), jak i nieorganicznych (siarkowodór, dwutlenek siarki, siarczki metylu, amoniak, tlenki azotu) [7]. Lista zanieczyszczeń, które są efektywnie usuwane na drodze biofiltracji, szybko wzrasta. Głównym elementem biofiltru jest warstwa wypełniająca, którą tradycyjnie tworzy materiał organiczny zasiedlony przez mikroorganizmy. Podczas przepływu gazów przez tę warstwę zanieczyszczenia są sorbowane, a następnie rozkładane. Powszechne zastosowanie biofiltrów związane jest z ich prostotą, niskimi kosztami, możliwością usuwania coraz szerszej grupy związków oraz brakiem generowania uciążliwych odpadów.

Efektywność biofiltracji kształtuje się zwykle, w zależności od rodzaju oczyszczanych gazów i typu instalacji, w przedziale od 80% do 100%, chociaż można odnotować również niższe sprawności – rzędu 50÷80% [5]. Ponadto według [8] skuteczność usuwania z gazów węgla organicznego na drodze biofiltracji wynosi zwykle 50÷94%, a zapachów 82÷94%. Efektywność biofiltracji uzależniona jest w bardzo dużym stopniu od parametrów eksploatacyjnych instalacji – przede wszystkim od wartości obciążenia powierzchniowego, wysokości warstwy wypełnienia, czasu kontaktu gazów z tą warstwą oraz oporów przepływu. Bardzo ważnym czynnikiem, warunkującym dobre efekty procesu biofiltracji, jest także właściwy dobór materiału wypełniającego. Istotny wpływ na efektywność oczyszczania gazów mają takie parametry wypełnienia, jak: zawartość substancji organicznych i odżywczych, skład granulometryczny (średnica zastępcza), wilgotność i zdolność zatrzymywania wody, odczyn, temperatura. Także właściwości gazów poddawanych biologicznemu oczyszczaniu w biofiltrze – wilgotność, temperatura, rodzaj i ilość zanieczyszczeń – mają znaczenie, jeśli chodzi o skuteczność ich oczyszczania.

Obciążenie powierzchniowe biofiltru to dopuszczalna objętość gazu przepływająca przez jednostkową powierzchnię w jednostce czasu, inaczej wyrażana jako prędkość przepływu gazów przez warstwę wypełnienia. Wg [11] stosowane prędkości mieszczą się w granicach 0,0056÷0,14 m/s, co odpowiada obciążeniu powierzchniowemu 20÷500 m³/m²/h. Inne źródła wskazują zalecane prędkości przepływu gazów przez złoża filtracyjne na poziomie od 0,01 do 0,1 m/s. Zgodnie z wytycznymi VDI 3477 wskaźnik powierzchniowego obciążenia złoża powinien znajdować się w granicach od 45÷150 m³/m²/h [2].

Wysokość warstwy wypełnienia w pracujących biofiltrach wynosi zwykle od 0,5 m do 1,6 m. Minimalna miąższość powinna zapewnić stały przepływ gazu, odpowiednio długi czas kontaktu oraz uniemożliwić powstawanie perforacji złoża [2]. Czas kontaktu gazów z warstwą wypełnienia waha się zwykle w przedziale od 6 s do 720 s [2] zaleca, aby dla biofiltrów kompostowych wynosił on 30 s, a dla glebowych – minimum 1 min.

Oporę przepływu gazu przez warstwę wypełnienia pracujących biofiltrów wynoszą zwykle od 1,2 hPa do 12,5 hPa [2]. Zależą od rodzaju materiału wypełniającego, jego wilgotności oraz prędkości przepływu gazów (obciążenia powierzchniowego). Dla biofiltru kompostowego z korą, przy obciążeniu powierzchniowym 300 m³/m²/h i wysokości warstwy wypełnienia 1 m, spadek ciśnienia nie przekraczał wartości 4,5 hPa [10]. Biofiltr eksploatowany z obciążeniem powierzchniowym w zakresie 40÷160 m³/m²/h, wypełniony stabilizatorem z odpadów komunalnych o wilgotności od 18% do 40%, charakteryzował się oporami przepływu w zakresie 0,4÷2,4 hPa [1]. W [2] wykazano natomiast wyższe wartości spadku ciśnienia w warstwie wypełniającej biofiltru. Według doniesień niemieckich [2] opory przepływu znajdują się w przedziale

6÷12 hPa w biofiltrach z wypełnieniem w postaci kompostu z odpadów o wilgotności 50÷65%, pracujących z obciążeniem powierzchniowym do 90 m³/m²/h.

Obecność wilgoci w warstwie wypełnienia sprzyja procesowi utleniania mikrobiologicznego, jest podstawowym warunkiem zapewniającym optymalną aktywność mikroorganizmów i w dużym stopniu decyduje o sprawności oczyszczania gazów; wilgotność wypełnienia i wysokość jego warstwy to najistotniejsze parametry dla utrzymania właściwej pracy biofiltra, a ponad 50% problemów eksploatacyjnych wiąże się właśnie z wilgotnością złoża. Według [2] wilgotność powinna być utrzymywana w przedziale 30÷60%. W pracy [8] wskazuje się jako optymalną zawartość wody w kompostowym wypełnieniu biofiltrów wartości od 20% do 40%, a glebowych 10÷20%. Zalecane wartości wilgotności powinny się utrzymywać w przedziale 40–60%, w zależności od zastosowanego materiału wypełniającego [9]. Zbyt duże nasycenie wodą materiału wypełniającego przyczynia się do powstawania warunków beztlenowych i stref stagnacji z ograniczoną dyfuzją, wzrostu oporów przepływu i wymagań energetycznych oraz zmniejszenia efektywności biofiltracji [3]. Zbyt niska zawartość wody powoduje natomiast pęknięcie złoża i spadek aktywności mikrobiologicznej [9], przyczyniając się w ten sposób także do obniżenia skuteczności oczyszczania gazów.

Odpowiednia zawartość substancji organicznej w materiale wypełniającym jest również niezbędna dla utrzymania właściwej liczby i aktywności mikroorganizmów. Według [12] zawartość materiału organicznego w złożu biofiltru powinna wynosić minimum 55%, a stosunek pierwiastków C:N:P – 100:5:1. Z kolei zgodnie z [2] proporcje między węglem, azotem i fosforem należy utrzymywać na poziomie 200:10:1.

Wskazuje się, iż materiał wypełniający biofiltr powinien charakteryzować się takim składem granulometrycznym, aby średnica zastępcza jego ziaren była większa niż 4 mm [12]. Jego odczyn powinien znajdować się w zakresie 6÷9 pH [9] (spadek poniżej tych wartości często powoduje obniżenie efektywności biofiltracji). Temperatura w warstwie wypełnienia związana jest z działalnością mikroorganizmów oraz z temperaturą oczyszczanego gazu [5]. Według [9] optymalne wartości temperatur wynoszą 25÷40°C, a zgodnie z [3] nie powinny przekraczać 50°C. Za optymalny zakres uznaje się przedział 25÷40°C [6]. [9] podają przykłady eksploatacji biofiltrów przy temperaturze wypełnienia w zakresie poniżej 10°C.

Gazy kierowane do procesu biofiltracji należy nawilżyć do stanu nasycenia [5], a ich temperatura nie powinna przekraczać 60°C. Jej zalecany zakres waha się w granicach między minimum ponad temperaturę zamarzania wody, a maksimum 40°C.

Podczas oczyszczania gazów pochodzących z procesu kompostowania odpadów z wykorzystaniem biofiltru z wypełnieniem w postaci kory, o miąższości 0,8 m, charakteryzującym się odczynem na poziomie 7 pH, temperaturą w złożu 20÷30°C, obciążeniem powierzchniowym 120 m³/m²/h oraz oporami przepływu 10 hPa, osiągnięto efektywność usuwania zapachu na poziomie 95%. W procesie oczyszczania gazów, pochodzących z produkcji mączki, z wykorzystaniem biofiltru z wypełnieniem torfowo-wrzosowym, o wysokości 1,0 m, charakteryzującym się temperaturą w złożu na poziomie 20÷35°C, obciążeniem powierzchniowym 165 m³/m²/h oraz oporami przepływu poniżej 12,5 hPa, osiągnięto efektywność usuwania lotnych związków organicznych na poziomie 85%, a amoniaku – 97%. Podczas oczyszczania gazów pochodzących z procesu suszenia odchodów z wykorzystaniem biofiltru z wypełnieniem w postaci wrzosu, o miąższości 1,0 m, charakteryzującym się temperaturą w złożu na poziomie 35°C, obciążeniem powierzchniowym 100 m³/m²/h oraz oporami przepływu poniżej 1,5 hPa, osiągnięto efektywność usuwania lotnych związków organicznych na poziomie 51%, a amoniaku – 75%. Oczyszczanie

gazów pochodzących z zakładów tłuszczowych z wykorzystaniem biofiltru z wypełnieniem wrzosowo-torfowym, o miąższości 1,0 m, temperaturze w złożu – 20÷30 °C, obciążeniem powierzchniowym 120 m³/m²/h oraz oporami przepływu poniżej 1,5 hPa charakteryzowało się efektywnością usuwania sumy kwasów organicznych na poziomie 86%, a amoniaku – 96% [2]. [5] wskazuje na skuteczność usuwania węgla organicznego z gazów przy zastosowaniu biofiltra kompostowego (obciążenie powierzchniowe 60÷80 m³/m²/h, wysokość warstwy wypełnienia 1 m) na poziomie od 92% do 96%. Skuteczność usuwania LZO w biofiltrach z wypełnieniem kompostowo-torfowym z perlitem, korą i zrębkami drzewnymi oceniono na poziomie 40÷100%, a amoniaku – 96÷98% [9].

Metodyka badawcza

Celem badań była diagnoza możliwości zmian eksploatacyjnych w istniejącym biofiltrze. Obiektem badań był biofiltr zlokalizowany na terenie zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Jest to biofiltr powierzchniowy płaski, otwarty o wymiarach 13,25 m × 29,89 m (obszar aktywny biologicznie: 396 m²). Gazy procesowe odprowadzane z hali obróbki wstępnej oraz hali biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych kierowane są do płuczki, a następnie do badanego biofiltra. Daje on możliwość oczyszczania maksymalnie 45 000 m³/h gazów.

Materiał wypełniający stanowią: zrębki, zrżyny (rąbane drzewo świerkowe), kora, torf włóknisty oraz wrzos. Na powierzchni zaobserwowano obszary pokryte gałęziami, mchem oraz zrębkami (rys. 1). Wysokość wypełnienia wynosi od 0,5 m do 0,7 m.

Zakres przeprowadzonych badań objął:

- badania technologiczne wypełnienia biofiltru (wilgotność, zawartości substancji organicznych, zawartości substancji odżywczych, odczyn pH, skład granulometryczny, porowatość i powierzchnia właściwa),



Rys. 1. Widok powierzchni badanego biofiltra w części wschodniej
Fig. 1. View of the eastern part surface of the tested biofilter



Rys. 2. Rozprowadzenie gazów procesowych do poszczególnych segmentów badanego biofiltra
Fig. 2. Distribution of process gases to individual segments of the tested biofilter

- badania gazów procesowych – poddawanych oczyszczaniu i gazów oczyszczonych (temperatura, wilgotność, stężenia zanieczyszczeń wiodących),
- ocenę parametrów eksploatacyjnych badanego biofiltru (obciążenie powierzchniowe, obciążenie objętościowe, czas kontaktu gazów z warstwą wypełnienia, wielkość aktualnego strumienia gazów kierowanych do oczyszczania, opory przepływu gazów przez warstwę wypełnienia, równomierność rozprowadzenia gazów w złożu biofiltru, kontrola występowania stref beztlenowych i stref nieaktywnych, ocena efektywności biofiltracji).

Badania przeprowadzono według następującej metodyki:

- Oznaczenie pH materiału wypełniającego wg PN-ISO 10390:1997;
- Oznaczenie zawartości wilgoci całkowitej materiału wypełniającego wg PN-Z-15008-02:1993;
- Oznaczenie zawartości substancji organicznych, węgla organicznego, azotu, fosforu w materiale wypełniającym wg PN-Z-15011-3:2001;
- Skład granulometryczny materiału wypełniającego wg PN-Z-15011-2:1998 (użyto sita o oczkach: 0,071; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 10,0; 25,0 mm);
- Temperatura w warstwie wypełnienia – pomiar za pomocą czujnika temperatury TP-03 z elektronicznym miernikiem firmy Czaki Termo-Product, typu EMT-06;
- Zawartość amoniaku, siarkowodoru, LZO w gazach procesowych (poddawanych oczyszczaniu i oczyszczonych) – pomiar przy zastosowaniu detektora wielogazowego MultiRAE (Rae Systems);
- Zawartość kwasu octowego i etanolu w gazach procesowych (poddawanych oczyszczaniu i oczyszczonych) – pomiar przy zastosowaniu rurek wskaźnikowych (Rae Systems);
- Temperatura, wilgotność, odczyn gazów (poddawanych oczyszczaniu i oczyszczonych) – pomiar przy zastosowaniu termooanemometru TA440 (Airflow Instruments).
- Próbkę z powierzchni biofiltra (ze źródła powierzchniowego) pobierane były przy zastosowaniu osłony, eliminującej wpływ czynników zewnętrznych.

Wyniki badań

W tab. 1 i 2 przedstawiono wyniki badań wypełnienia analizowanego biofiltra, gazów procesowych i parametrów eksploatacyjnych.

Tabela 1. Zbiornicze wyniki badań materiału wypełniającego analizowany biofiltr
Table 1. Cumulative test results of the filling material for the analyzed biofilter

Parametr	Jednostki	Zakres wartości
Wilgotność	%	76,8÷77,4
pH	–	5,41÷5,80
Temperatura	°C	15,5÷31,5
Zawartość substancji organicznej	% s.m.	90,17÷93,31
Węgiel organiczny	% s.m.	43,24÷46,37
Azot organiczny	% s.m.	2,30÷2,80
Fosfor organiczny	%P ₂ O ₅ s.m.	0,19÷0,23
C:N:P	–	200:11(12):1
Średnica zastępcza	mm	10,3÷13,7

Tabela 2. Zbiorcze wyniki badań gazów procesowych i parametrów eksploatacyjnych analizowanego biofiltru

Table 2. Cumulative results of research on process gases and operating parameters of the analyzed biofilter

Wskaźnik	Jednostka	Zakres wartości
gazy procesowe i parametry eksploatacyjne		
Natężenie przepływu	m ³ /h	30 200÷37 200
Wysokość warstwy wypełnienia	m	0,5÷0,7
Powierzchnia aktywna biofiltru	m ²	396
Obciążenie objętościowe	m ³ /m ² /h	76÷94
Czas kontaktu gazów z warstwą wypełnienia	s	24÷28
gazy surowe		
Wilgotność	%	100
Temperatura	°C	25÷33
pH	pH	6,72÷7,50
gazy oczyszczone		
Efektywność usuwania H ₂ S	%	20÷100
Efektywność usuwania LZO	%	14÷84
Efektywność usuwania kwasu octowego	%	100
Efektywność usuwania etanolu	%	100

Analiza i dyskusja wyników

Materiał wypełniający biofiltr pobierany był podczas trzech serii pomiarowych, każdorazowo z trzech miejsc instalacji.

Uzyskane wyniki wskazują, iż materiał wypełniający badany biofiltr charakteryzuje się bardzo wysokimi zawartościami ogólnej substancji organicznej oraz węgla organicznego – odpowiednio w zakresie średnio od 90,4% do 93,3% oraz od 43,2% do 46,4%. Nie odnotowano znaczących różnic w czasie trwania cyklu badawczego, niezależnie od miejsca poboru próbek. Stosunek C:N:P jest zgodny z zalecanymi wartościami literaturowymi [2].

Średnica zastępcza wypełnienia kształtowała się na poziomie od 12,5 mm do 13,7 mm, co odpowiada wartościom wskazywanym jako prawidłowe.

Uzyskane wyniki wskazują natomiast na bardzo wysoką wilgotność zastosowanego materiału wypełniającego badany biofiltr, utrzymującą się na stałym poziomie (ok. 77%) w czasie trwania cyklu badawczego, niezależnie od miejsca poboru próbek. Poziom wilgotności określony na podstawie przeprowadzonych badań przekracza wartości zalecane [2] i stwarza niebezpieczeństwo występowania stref beztlenowych.

Odczyn materiału wypełniającego wynosił od 5,41 pH do 5,80 pH. Wartości te znajdują się poniżej poziomu zalecanego [9] i również wskazują na częściowy udział procesów beztlenowych w procesach rozkładu w warstwie wypełnienia.

Wysokość złoża jest zróżnicowana i waha się w granicach od 0,5 m do 0,7 m. Wartości na tym poziomie wskazywane są jako wartości minimalne dla umożliwienia efektywnej pracy instalacji [2].

Temperatura wewnątrz wypełnienia utrzymywała się w przedziale od 15,5°C do 31,5°C i w znacznym stopniu uzależniona była od temperatury otoczenia.

Badany biofiltr jest biofiltrem powierzchniowym, otwartym, pracującym z prawidłowym obciążeniem powierzchniowym – w zakresie od 76 do 94 m³/m²/h. Charakteryzuje się jednak zbyt krótkim czasem kontaktu oczyszczanych gazów z warstwą wypełnienia (od 23 s do 28 s) – niektóre źródła literaturowe wskazują te wartości jako dolną granicę zalecanego poziomu – co związane jest ze zbyt małą wysokością warstwy złoża.

Gazy procesowe pobierane były podczas pięciu serii pomiarowych. Gazy surowe pobierano w punkcie ich wprowadzenia do biofiltru, a oczyszczone – każdorazowo z trzech miejsc instalacji.

Podstawowe parametry gazów surowych (wilgotność, temperatura, zawartość zanieczyszczeń wodzących) są prawidłowe i nie dyskwalifikują ich do oczyszczania przy zastosowaniu metod biologicznych.

Odnotowano jednak nieprawidłowości związane z efektywnością biofiltracji, wynikające przede wszystkim z niewłaściwie dobranej warstwy wypełniającego i niewłaściwie prowadzonej eksploatacji biofiltru. Wprawdzie względem zanieczyszczeń, które występują w gazach surowych w niewielkich ilościach (etanol, kwas octowy) odnotowano 100% efektywność oczyszczania, jednak w przypadku zanieczyszczeń występujących w większych stężeniach (LZO), sprawność była znacznie niższa i przyjmowała zróżnicowane wartości – od 14% do 84%. Ponadto w różnych miejscach instalacji okresowo dochodziło do wtórnego zanieczyszczenia – zwiększenia emisji LZO. Zmiana warunków eksploatacji nie spowodowała istotnych zmian w efektywności usuwania zanieczyszczenia wodzącego, jakim są LZO.

Usuwanie z gazów procesowych siarkowodoru przy zastosowaniu badanego biofiltru utrzymywało się także na zróżnicowanym poziomie (od 20% do 100%) mimo niskiego stężenia tego związku w gazach surowych (obserwowanego jedynie okresowo). Także w tym przypadku odnotowano okresowo występujące wtórne zanieczyszczenie.

Zwiększone stężenia LZO i siarkowodoru w gazach po biofiltrze są wynikiem nieprawidłowej eksploatacji instalacji, związanej z utrzymywaniem nadmiernej wilgotności w warstwie wypełnienia, co z kolei powoduje, iż procesy zachodzące wewnątrz tej warstwy mają charakter tlenowo-beztlenowy.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wskazują, iż badany biofiltr charakteryzuje się prawidłowym obciążeniem powierzchniowym, a gazy poddawane oczyszczaniu – prawidłowymi podstawowymi parametrami, umożliwiającymi ich oczyszczanie metodami biotechnologicznymi.

Jako wypełnienie zastosowano materiał o korzystnej zawartości substancji organicznych i odżywczych, jednak o nadmiernej zdolności pochłaniania wody, co utrudnia utrzymanie wilgotności na prawidłowym poziomie. Zróżnicowane wyniki dotyczące efektywności biofiltracji wskazują na niejednorodność przepływu gazów przez warstwę wypełnienia i obecność stref nieaktywnych w tej warstwie. Nieprawidłowości związane z efektywnością biofiltracji wynikają przede wszystkim z niewłaściwie dobranej warstwy wypełniającego i niewłaściwie prowadzonej eksploatacji biofiltru – są wynikiem utrzymywania nadmiernej wilgotności w warstwie wypełnienia, co z kolei powoduje, iż procesy zachodzące w jej wnętrzu mają charakter tlenowo-beztlenowy.

W oparciu o badania technologiczne wskazuje się na konieczność przeprowadzenia niezbędnych zmian eksploatacyjnych w zakresie:

- zastosowanych materiałów wypełniających – wymiana wypełnienia,
- wilgotności wypełnienia – eksploatacja umożliwiająca utrzymanie wilgotności w zakresie 20÷60%,
- odczynu wypełnienia – wybór właściwego materiału wypełniającego oraz eksploatacja umożliwiająca utrzymanie odczynu w zakresie 6÷9 pH,
- wysokości warstwy wypełnienia – kontrola miąższości tej warstwy i utrzymywanie jej na stałym poziomie około 1 m,
- czasu kontaktu gazów z warstwą wypełnienia – wydłużenie tego czasu poprzez korektę i kontrolę miąższości warstwy materiału wypełniającego.

LITERATURA

- [1] Barbusiński K, Kalembe K., Kasperczyk D., Urbaniec K. and Kozik V. "Biological methods for odor treatment – A review", *Journal of Cleaner Production* 152(2017), str. 223-41. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.03.093.
- [2] Biologische Abgasreinigung – Biofilter (Biological waste gas purification – Biofilters). VDI 3477:2016-03. *The Association of German Engineers*; 2016. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3477/239551088>.
- [3] Bohn H. "Soil and compost filters of malodorous gases". *Journal of the Air Pollution Control Association*. 25:9(1975), str. 953-5. DOI:10.1080/00022470.1975.10468118.
- [4] Kennes, C and Thalasso, F. "Review: Waste gas biotreatment technology", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 72(1998), str. 303–319. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4660(199808)72:4<303::AID-JCTB903>3.0.CO;2-Y.
- [5] KwarciaK-Kozłowska, A. and Bańka, B. „Biofiltracja jako metoda unieszkodliwiania odorów powstających podczas kompostowania frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych i przemysłowych”, 17:4 (2014), pp. 631–645.
- [6] Kwaśny J., Balcerzak W. „Charakterystyka wybranych metod pośrednich ograniczania emisji substancji złoonych”. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 16:4(2014), str. 125–134.
- [7] Lelicinska-Serafin K., Rolewicz-Kalinska A., Manczarski P. "VOC removal performance of a joint process coupling biofiltration and membrane-filtration treating food industry waste gas" *Int J Environ Res Public Health*. 2019; 16(17): str. 1–4. DOI:10.3390/ijerph16173009.
- [8] Leson, G., Winer, A.M. and Leson, G. "Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology For VOC Emissions", *Journal of the Air & Waste Management Association* 41;8(1991), str. 1045–1054, DOI:10.1080/10473289.1991.10466898.
- [9] McNevin, D. and Barford, J. "Biofiltration as an odour abatement strategy", *Biochemical Engineering Journal*, 5:3(2000), str. 231–242.
- [10] Rolewicz-Kalinska A, Lelicińska-Serafin K, Manczarski P. "Volatile organic compounds, ammonia and hydrogen sulphide removal using a two-stage-membrane biofiltration process", *Chemical Engineering Research and Design* 165(2021), str. 69–80. DOI:10.1016/j.cherd.2020.10.017.
- [11] Tiwari A, Alam T, Kumar A, Shukla A. Control of odour, volatile organic compounds (VOCs) & toxic gases through biofiltration – An overview. *Int J Tech Innov Mod Eng Sci*. 5(2019), str. 1–6. http://ijtimes.com/papers/special_papers/ICMTCE13.pdf.
- [12] Wierzbińska M., Modzelewski WE. "The use of biofilters for deodorisation of the noxious gases". *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2015;(41):125-132. doi:10.12912/23920629/1836.