

ZASTOSOWANIE BIOFILTRÓW DO DEZODORYZACJI UCIĄŻLIWYCH GAZÓW

Monika Wierzbńska¹, Witold Eugeniusz Modzelewski²

¹ Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, Bielsko-Biała, e-mail: mwierzbinska@ath.bielsko.pl

² Laminopol Sp. z o.o., ul. Szczecińska 58B. 76-200 Słupsk, e-mail: witoldmodzelewski6@wp.pl

STRESZCZENIE

Jedną z metod dezodoryzacji uciążliwych gazów jest metoda biofiltracji, polegająca na biodegradacji zanieczyszczeń z udziałem mikroorganizmów, w wyniku czego powstają związki nietoksyczne i nieuciążliwe dla środowiska. Metoda ta jest stosunkowo tania i praktycznie bezodpadowa, stanowi więc alternatywę dla klasycznych metod oczyszczania gazów z zanieczyszczeń odorotwórczych. W laboratoriach naukowych przeprowadza się wiele badań w zakresie optymalizacji procesu biofiltracji oraz podwyższania efektywności metody. W warunkach przemysłowych zastosowanie biofiltrów nadal jednak stwarza duże problemy. W artykule opisano mechanizm procesu biofiltracji, parametry i warunki, jakie muszą spełniać gazy poddawane oczyszczaniu, budowę instalacji do biofiltracji gazów, obszar zastosowań metody oraz przykłady eksploatowanych biofiltrów z uwzględnieniem praktycznych wytycznych eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: biofiltr, biofiltracja, dezodoryzacja.

THE USE OF BIOFILTERS FOR DEODORISATION OF THE NOXIOUS GASES

ABSTRACT

One of the methods of deodorization of noxious gases is biofiltration. This method consists of pollutants biodegradation by using micro-organisms, what leads to the formation of nontoxic and innoxious compounds. In comparison with conventional techniques, bio-filtration requires lower investments and exploitation costs, moreover it is nature friendly. This technique is still developing. Scientists have carried out research on the optimization of biofiltration process, biofilters and selecting parameters of purified gases or improving the method of efficiency. However, industrial application of biofilters is still difficult for many reasons. In this paper we present the mechanism of biofiltration process, the parameters and conditions which have to be fulfilled by purified gases, installation structure for gases biofiltration, application field of this method and specific example of exploited biofilters, including practical operational guidelines.

Keywords: biofilter, biofiltration, deodorisation.

WSTĘP

Niepożądane zapachy, występujące w otoczeniu źródeł zanieczyszczeń powietrza są główną przyczyną skarg ludności na jakość środowiska. W niektórych sytuacjach są one kojarzone z wystąpieniem zagrożenia zdrowia, w innych – z dyskomfortem. Wyniki interwencyjnych kontroli przeprowadzanych przez inspektorów, przeważnie potwierdzają zasadność skarg – dużą uciążliwość ocenianych obiektów. Niestety pokontrolne zalecenia ograniczenia

zapachowej uciążliwości trudno formalnie uzasadnić i egzekwować, dlatego też „decyzja o dopuszczalnej emisji” zwykle nie jest przestrzegana, ponieważ nie precyzuje obowiązku ograniczania emisji odorantów [14].

Analizy składu chemicznego gazów emitowanych z zakładów przemysłowych oraz oczyszczalni ścieków, wykazują jednak, że podstawowe zanieczyszczenia odorowe, uciążliwe dla otoczenia, to substancje, dla których określono wartości odniesienia w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. [21].

Jednym ze źródeł szczególnie uciążliwych pod względem emisji odorantów jest przetwórstwo odpadów zwierzęcych. Jest ono źródłem emisji amoniaku, amin, siarkowodoru, siarcz-ków, skatoli, merkaptanów, aldehydów, kwasów organicznych i kadaweryny. Do innych bardzo uciążliwych gałęzi przemysłu należy przetwórstwo ryb i produkcja mączki rybnej z charakterystycznym odorantem: trójmetyloaminą. Na liście uciążliwych zakładów są rafinerie, zwłaszcza z instalacjami oksydacji asfaltów, odlewnie żeliwa, zakłady przemysłu gumowego, celulozowego i włókienniczego, fermy hodowlane, oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów oraz zakłady przemysłu tłuszczowego [21].

METODY DEZODORYZACJI GAZÓW ODLOTOWYCH

Dezodoryzacja jest jednym z trudniejszych zagadnień techniki oczyszczania gazów odlotowych. Niski próg wyczuwalności węchowej wielu gazów charakteryzujących się przykrym zapachem sprawia, że w większości przypadków dla jego likwidacji niezbędne jest niemal całkowite usunięcie substancji odorowej. Projektując procesy odorotwórcze, należy:

- unikać procesów okresowych z szybkim wytwarzaniem substancji odorowych w krótkim cyklu;
- rozważyć możliwość prowadzenia procesów pod ciśnieniem niższym od atmosferycznego;
- zminimalizować liczbę połączeń z możliwymi źródłami nieszczelności w rurociągach i aparaturze oraz liczbę pomp wirowych z uszczelnieniem dławicowym;
- unikać emisji odorów do środowiska podczas procesów technologicznych związanych z przenoszeniem, magazynowaniem i pobieraniem próbek oraz obsługą i czyszczeniem przez zapewnienie dobrej wentylacji wyciągowej, unikając zbyt dużej objętości powietrza kierowanego do procesu neutralizacji substancji odorowej [29].

Pierwotne systemy przemysłowe oczyszczania powietrza i gazów przemysłowych opierały się na prostych układach filtrów, usuwających substancje zapachowe i pyły [27].

Spośród metod dezodoryzacji gazów przemysłowych, opisywanych dotąd w literaturze wyróżnić należy:

1) metody chemiczne:

- wprowadzanie lotnego dezodorantu
- utlenianie lub chlorowanie
- spalanie termiczne
- spalanie katalityczne
- metody wykorzystujące procesy adsorpcyjne i absorpcyjne

2) metody biologiczne

- skrubery (płuczki biologiczne)
- biofiltry.

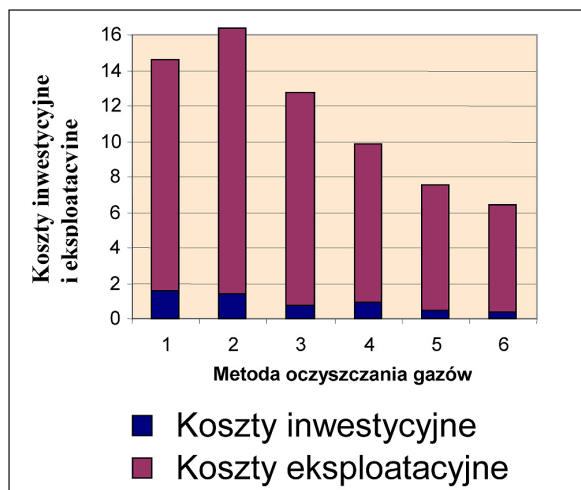
METODY BIOLOGICZNE

Biologiczne oczyszczanie gazów jest w praktyce realizowane głównie w takich instalacjach jak biopłuczki i biofiltry. Ponadto istnieją doniesienia o innych rozwiązaniach, znajdujących dotychczas mniejsze zastosowanie, jak np. przedmuchiwanie oczyszczanych gazów przez złoża biologiczne, czy też instalacje, wykorzystujące błony półprzepuszczalne [25].

W płuczkach biologicznych sorbentem jest osad czynny będący wodną zawiesiną mikroorganizmów, głównie heterotroficznych bakterii tlenowych. Oczyszczanie gazów odbywa się w absorberze, gdzie następuje przepływ zanieczyszczonego gazu w kierunku przeciwnym do sorbentu. W napowietrzanej komorze osadu czynnego, wskutek działania mikroorganizmów, zachodzi samooczyszczanie się sorbentu. Zregenerowany sorbent zwracany jest do absorbera.

W biofiltrach głównym elementem jest warstwa porowatego materiału filtracyjnego, zasiedlonego przez mikroorganizmy zdolne do biologicznego rozkładu zanieczyszczeń powietrza. Podczas powolnego przedmuchiwania gazów przez warstwę materiału filtracyjnego zanieczyszczenia są sorbowane, a następnie rozkładane przez mikroorganizmy. W końcowej fazie procesu biofiltracji dochodzi do samoregeneracji wypełnienia sorbentu.

W ostatniej dekadzie biologiczna degradacja lotnych związków organicznych emitowanych do atmosfery (VOC's – Volatile Organic Compounds) stała się alternatywą dla wielu fizycznych i fizykochemicznych metod oczyszczania powietrza z tychże zanieczyszczeń. Techniki biologicznego oczyszczania udowodniły swoją przydatność nie tylko do usuwania odorów, ale także niepożądanych związków emitowanych przez przemysł oraz inne źródła emisji VOC's [6].



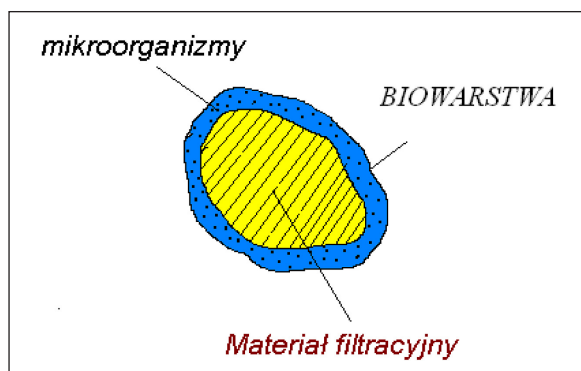
Rys. 1. Porównanie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wybranych metod oczyszczania gazów odlotowych ze związków organicznych: 1 – dopalanie termiczne, 2 – dopalanie katalityczne, 3 – adsorpcja, 4 – absorpcja, 5 – ozonowanie, 6 – biofiltracja [24]

Na rysunku 1 zestawiono ogólne koszty wybranych metod oczyszczania gazów odlotowych [24]. Sumarycznie, najdroższymi metodami okazały się dopalanie termiczne i katalityczne, natomiast metodą najmniej kosztowną – biofiltracja [24, 28].

BIOFILTRACJA

Biofiltracja jest procesem biologicznego usuwania zanieczyszczeń. Polega na biodegradacji zanieczyszczeń, w wyniku czego powstają związki nietoksyczne i nieuciążliwe dla środowiska.

W trakcie przepływu gazu przez warstwę materiału filtracyjnego, dochodzi do dyfuzji zanieczyszczeń z fazy gazowej do aktywnej biowarstwy, otaczającej cząstki materiału filtracyjnego [29]. Schemat biowarstwy przedstawiono



Rys. 2. Schemat biowarstwy (biofilmu) pokrywającej cząstkę materiału filtracyjnego

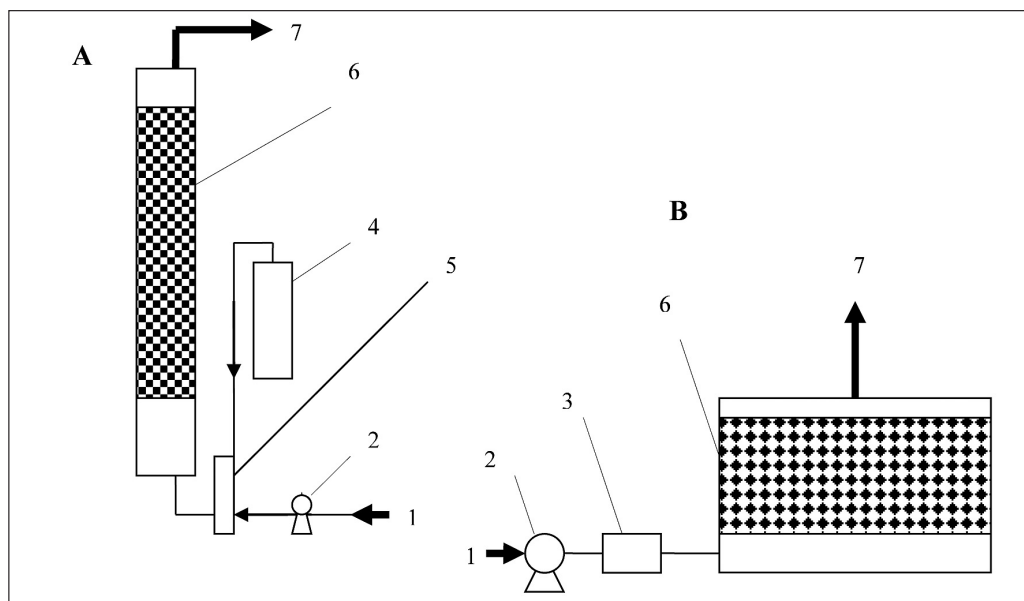
na rysunku 2. W fazie ciekłej, w której znajdują się zarówno rozpuszczone zanieczyszczenia, jak i mikroorganizmy i enzymy, zachodzi rozkład zanieczyszczeń gazowych z wytworzeniem CO_2 , H_2O i biomasy. Dzięki biomase następuje rozwój mikroorganizmów, które w konsekwencji „przetwarzają” większą ilość zanieczyszczeń.

W mineralizowaniu zanieczyszczeń organicznych biorą udział przede wszystkim bakterie, a także promieniowce, grzyby i mikotroficzne glony, jak np. sinice.

BUDOWA BIOFILTRA

Biofiltr składa się z obudowy oraz warstwy wypełniającej ją materiału filtracyjnego, zasiedlonego przez mikroorganizmy, przystosowane do rozkładu danego rodzaju zanieczyszczeń. Kształt biofiltra może być różny w zależności od możliwości przestrzennych oraz skali wykorzystania. W badaniach laboratoryjnych są to często rury o długości kilkudziesięciu cm, podczas, gdy w skali technicznej stosuje się kontenery o wysokości kilkudziesięciu cm do kilku metrów. Przykładowe schematy takich biofiltrów przedstawia rysunek 3. W przypadku biofiltrów przemysłowych, wyróżnić można dwa sposoby doprowadzenia zanieczyszczonych gazów: poprzez warstwę żwiru przykrywającego materiał filtracyjny, lub za pomocą komór szczelinowych [23]. W pierwszym przypadku zanieczyszczony gaz wprowadzany jest systemem perforowanych rur, umieszczonych w warstwie żwiru, której zadaniem jest ułatwienie równomiernego rozdziału gazu w biofiltrze. W drugim, zastosowane komory szczelinowe stanowią trwałą konstrukcję, stwarzającą możliwość wjechania na ich powierzchnię pojazdem mechanicznym, ułatwiającym prowadzenie niezbędnych czynności eksploatacyjnych. Biofiltry mogą być także budowane piętrowo, tzn. kilka biofiltrów jeden nad drugim.

Gazy poddawane procesowi biofiltracji powinny być nawilżane do wilgotności względnej rzędu 95–100%. Można to uzyskać poprzez doprowadzenie do strumienia gazów pary wodnej. W przypadku nadmiaru wody, występujące w instalacji niewielkie ilości kondensatu mogą być wykorzystywane do ponownego zraszania złoża filtracyjnego. Takie rozwiązanie gwarantuje, że instalacja będzie pracować bez zrzutu ścieków. W przypadku biofiltrów otwartych, odcieki pochodzące z wód deszczowych powinny być odprowadzane za pomocą drenażu.



Rys. 3. Schematy instalacji do dezodoryzacji gazów: A – instalacja laboratoryjna, B – instalacja przemysłowa, 1 – dopływ zanieczyszczonego gazu, 2 – urządzenie ssąco-tłoczące, 3 – komora nawilżania, 4 – zbiornik z parą wodną, 5 – komora mieszania, 6 – złożo biologicznie czynne, 7 – odpływ oczyszczonego gazu)

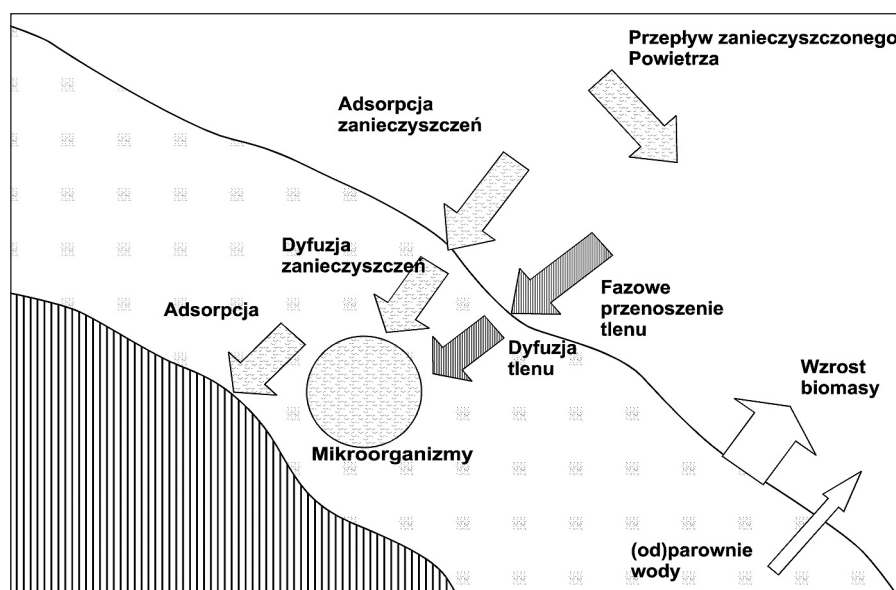
OPIS ZŁOŻONEGO PROCESU BIOFILTRACJI

Biofiltracja jest złożonym procesem usuwania zanieczyszczeń w fazie gazowej i ciekłej, prowadzącym do powstania produktów biodegradacji: CO_2 , H_2O i innych związków nieorganicznych. Podczas biofiltracji zachodzą różne procesy fizyczne i biologiczne, przedstawione schematycznie na rysunku 4 [5].

Zanieczyszczenia odorowe, zawarte w przepływającym powietrzu ulegają adsorpcji na

powierzchni ciekłej biowarstwy pokrywającej cząstki materiału filtracyjnego. Cząstki odorów zaadsorbowane na powierzchni biowarstwy przechodzą do fazy ciekłej i dyfundują w stronę mikroorganizmów, zasiedlających biowarstwę. W wyniku działania mikroorganizmów, cząstki zanieczyszczeń odorowych zostają rozłożone na dwutlenek węgla, wodę oraz inne związki nieorganiczne. Proces rozkładu zanieczyszczeń nosi nazwę biodegradacji.

Biodegradacja odbywa się w dwóch etapach. Pierwszym etapem jest biosorpcja, polegająca



Rys. 4. Mechanizm biofiltracji [5]

na zatrzymaniu zanieczyszczeń na powierzchni komórek. Powierzchnia komórki jest miejscem wymiany składników dyfundujących do wnętrza komórki oraz przenikania produktów przemiany materii i ektoenzymów (enzymów rozkładających materię poza komórką) w kierunku przeciwnym. Wymiana między treścią komórki a jej zewnętrznym środowiskiem decyduje o ciągłej regeneracji powierzchni i możliwości adsorbowania się nowych cząstek. Drugim etapem biodegradacji jest mineralizacja. Polega ona na enzymatycznym rozkładzie związków organicznych przez drobnoustroje, przy wykorzystaniu energii i pierwiastków biogennych oraz wydaleniu prostych produktów mineralnych (CO_2 , H_2O , NO_3^- , PO_4^- , SO_4^-). Rozkład cząstek organicznych zachodzi na ogół wewnątrz komórki. Związki wielkocząsteczkowe, takie jak: białka, celuloza, czy inne naturalne i syntetyczne polimery, są hydrolizowane poza komórką. Do wnętrza ustroju dyfundują produkty tego rozpadu, gdzie ulegają utlenianiu. Przemiany te zachodzą w warunkach tlenowych [18]. Fundamentalnymi mechanizmami w złożonym procesie biofiltracji, składającymi się na tzw. makro-kinetykę procesu usuwania zanieczyszczeń z gazów są – sorpcja zanieczyszczeń oraz ich biodegradacja [1].

Rezultatem rozkładu biologicznego pochłoniętych w biowarstwie zanieczyszczeń jest samoregeneracja materiału filtracyjnego, na powierzchni którego znajduje się biofilm. To samooczyszczanie się sorbentu sprawia, że technologia oczyszczania gazów za pomocą biofiltrów jest praktycznie bezodpadowa [25].

MATERIAŁY FILTRACYJNE

Materiał filtracyjny powinien stwarzać jak najkorzystniejsze warunki dla rozwoju mikroorganizmów w celu uzyskania maksymalnie szybkiej biodegradacji zanieczyszczeń.

Powinien być bogato zasiedlony przez mikroorganizmy. Zagęszczanie się materiału filtracyjnego z czasem eksploatacji powinno być minimalne. Porowatość złoża, czyli wielkość i rozmieszczenie ziaren oraz struktura porów muszą zapewniać dużą aktywność powierzchniową przy niskim spadku ciśnienia gazu (duża powierzchnia właściwa, luźna struktura, niskie opory przepływu gazu). Określanie aktywności materiału filtracyjnego w odniesieniu do pochłanianego zanieczyszczenia jest czynnością niezbędną. Dostępna

literatura o biofiltrach nie zawiera szczegółowych informacji na ten temat [26]. Świeży (surowy) materiał filtracyjny powinien mieć pH 7–8, objętość porów powyżej 90%, średnicę d_{50} ziarna większą niż 4 mm. Powinien zawierać powyżej 55% materiału organicznego.

Dobrymi wypełnieniami filtrów biologicznych okazały się następujące materiały organiczne: żyzna gleba o spulchnionej strukturze [2, 11, 30], torf [4, 9, 10, 15] oraz odpady torfowe, komposty z kory drzew [8], odpady drzewne oraz komposty z odpadów komunalnych [3, 7, 12, 16, 17, 19, 20, 22].

BIODEGRADACJA ZANIECZYSZCZEŃ

W przyrodzie istnieje wielka różnorodność bakterii heterotroficznych, znajdujących się głównie w glebie i wodzie, mających zdolność przyswajania materii organicznej. Bakterie te uczestniczą w ważnym procesie, polegającym na oczyszczaniu i regeneracji środowiska naturalnego. Wiele z tych bakterii posiada zdolność do rozkładania substancji organicznych, nie spotykanych w naturalnym środowisku przyrodniczym, takich jak np. odpady przemysłowe [25].

Mikroorganizmy znajdujące się w glebie rozkładają materię organiczną. Należą do nich bakterie z gatunku *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Flavobacterium* i *Micrococcus* oraz grzyby z gatunku *Cephalosporium*, *Paecilomyces*, *Aspergillus* i *Penicillium*.

Mikroorganizmy bardzo łatwo adaptują się do rozkładu zanieczyszczeń zawierających alkohole, ketony i estry. Kompost zwykle zawiera wystarczającą ilość i różnorodność mikroorganizmów zdolnych do rozkładu biochemicznego złożonych zanieczyszczeń. Jednocześnie mikroorganizmy wykazują dużą zdolność zaadaptowania się do specyficznych zanieczyszczeń zawartych w gazach odlotowych.

Czasami celowe jest wprowadzenie zaszczepu (mieszanina mikroorganizmów oraz pożywka) celem zwiększenia liczby mikroorganizmów, bądź też celem wprowadzenia specyficznych dla danych zanieczyszczeń mikroorganizmów. Można w ten sposób przygotować biofiltr do rozkładu substancji trudno biochemicznie rozkładalnych takich jak: chlorowane węglowodory np. dwuchlorometan i większość węglowodorów aromatycznych np. benzen, toluen, ksylen. Dzięki takim zabiegom uzyskuje się bardzo dobre efekty usunięcia większości węglowodorów z gazów przemysłowych (efektywność oczyszczania ponad 90%) [11].

BIOFILTRY W PRZEMYŚLE

Jedną z firm produkujących biofiltry jest firma Laminopol Sp. z o.o. ze Słupska, zajmująca się również ich projektowaniem i instalacjami w zakładach o różnej specyfice emisji substancji odorowych. W okresie ponad 15 lat firma zaprojektowała i uruchomiła ponad 130 urządzeń do oczyszczania powietrza metodą biologiczną. Głównymi odbiorcami urządzeń są oczyszczalnie ścieków komunalnych i zakłady spożywcze. Biofiltry produkowane przez Laminopol znalazły zastosowanie w instalacjach:

- 1) do oczyszczania powietrza odlotowego z zakładowej oczyszczalni ścieków w zakładzie przetwórstwa rybnego Lisner w Poznaniu, w 2004 roku. W celu redukcji stężeń zanieczyszczeń powietrza zastosowano urządzenie o wydajności 1100 m³/godz. Uzyskany średni stopień redukcji zanieczyszczeń wynosił 92%;
- 2) do oczyszczania powietrza odlotowego w zakładach produkcji mączki rybnej. Pierwszą taką instalację uruchomiono w zakładzie w Bokinach k/ Białegostoku w 2011 roku;
- 3) do oczyszczania powietrza odlotowego z obiektów zakładowej oczyszczalni ścieków w Lotos S.A. Uruchomiono trzy biofiltry o łącznej wydajności 9280 m³/h. Uzyskano redukcję węglowodorów w zakresie od 88 do 90%.
- 4) w zakładach tłuszczowych Bielmar w Bielsku-Białej. Uruchomiono biofiltr o wydajności 580 m³/h.
- 5) do oczyszczania gazów odlotowych z instalacji tlenowej stabilizacji odpadów komunalnych. Uruchomiono dwie instalacje w 2013 r., o wydajności ponad 20 000 m³/h.

Zaprojektowane i zainstalowane urządzenia (fot. 1) umożliwiły redukcję zanieczyszczeń:

- w instalacjach oczyszczalni ścieków, zakładów tłuszczowych, zakładów przetwórczych przemysłu spożywczego, w zakresie od 90 do 95%;
- w instalacjach redukcji związków węglowodorowych – ponad 80%.

Przykładowa instalacja do biofiltracji gazów odlotowych

Obiekty, w których następuje emisja uciążliwych dla obsługi i otoczenia związków zapachowych zostają najpierw zhermetyzowane i wyposażone w instalację wentylacyjną, umożliwiającą nawiew powietrza do obiektu i wyciąg powietrza z przestrzeni obiektu. Proces oczyszczania powietrza rozpoczyna się od wyciągu zanieczyszczonego powietrza z miejsc emisji i przetransportowania tego powietrza za pomocą kanałów wentylacyjnych i wentylatora do nawilzacza powietrza. W nawilzaczu następuje wzrost wilgotności względnej powietrza na skutek rozpylania wody w komorze nawilzacza. Woda jest rozpylana za pomocą pompy cyrkulacyjnej i zespołu dysz. Po przejściu przez nawilzacza, nawilżone powietrze systemem kanałów wentylacyjnych transportowane jest do komory powietrznej zbiornika z biomasą. Komora ta znajduje się pod podłogą, na której umieszczona jest biomasa – materiał filtracyjny. Na skutek przyrostu ciśnienia wytworzonego przez wentylator, powietrze wtłoczone do komory powietrznej pokonuje opór hydrauliczny złoża i przechodzi przez biomasę, gdzie następuje biologiczny rozkład związków zapachowych. Mikroorganizmy zaszczerpione w materiale filtracyjnym rozkładają uciążliwe zapachowo substancje gazowe na dwutlenek i wodę. Taki sposób biologicznego oczyszczania nie generuje żadnych dodatkowych zanieczyszczeń. Oczyszczane powietrze swobodnie uchodzi do atmosfery przez górną powierzchnię złoża.



Fot. 1. Przykładowe biofiltry firmy Laminopol Sp. z o.o.

Instalacja biologicznego oczyszczania powietrza składa się z następujących elementów podstawowych (fot. 2):

- wentylator promieniowy wykonany ze stali nierdzewnej A4 (materiał 316 według AISI) wyposażony w kompensatory drgań i rurociągi pomiędzy wentylatorem i nawilżaczem,
- kompletny nawilżacz powietrza wyposażony w niezbędne urządzenia, w celu wytworzenia mgły wodnej i czujniki stanu pracy; nawilżacz wraz z wyposażeniem wykonany jest z materiału odpornego na działanie kropli związków zanieczyszczonego powietrza oraz atmosfery (laminat poliestrowo-szklany o odpowiednio dobranym układzie warstw),
- kompletny zbiornik z biomasą; ściany zbiornika wykonane są z laminatu poliestrowo-szklanego, odpornego na działanie kropli związków zanieczyszczonego powietrza oraz atmosfery; materiał użyty do budowy ścian gwarantuje ich długotrwałą eksploatację bez konieczności prac konserwacyjnych,
- rozdzielnica elektryczna, zawierająca wszystkie niezbędne do zasilania i pracy urządzenia, sterowniki, regulatory oraz przekaźniki stanów pracy,
- mierniki i wskaźniki kontroli pracy z odczytem lokalnym, umożliwiające niezbędną kontrolę poprawności działania urządzenia,
- materiał filtracyjny (biomasa) – może to być kompost, produkowany z wiórów drzewnych, korzeni, kory, liści lub włókno kokosowe z domieszką torfu włóknistego.

Wytyczne eksploatacyjne

Poza podstawową kontrolą urządzeń wentylacyjnych i mechanicznych, w trakcie eksploatacji należy badać:

- parametry mikrobiologiczne (wartości odżywcze biomasy) – co 6 miesięcy,

- wilgotność – co 3 miesiące,
- inne właściwości fizyczne biomasy – co 12 miesięcy.

Koszty eksploatacji są związane z zużyciem wody i energii elektrycznej, w zależności od wielkości systemu. Sam biofiltr, wykonany z laminatu poliestrowo-szklanego, nie wymaga nakładów i zabiegów konserwacyjnych.

Ekonomiczność

Porównując znane metody dezodoryzacji gazów przemysłowych (rys. 1), należy stwierdzić, że biofiltracja jest najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem ze względu na jej efektywność, konkurencyjne nakłady inwestycyjne i niskie koszty eksploatacji. Dla porównania:

- wyjątkowo skuteczne metody termicznego i katalitycznego utleniania, wymagają wysokich nakładów początkowych i eksploatacyjnych i są stosowane dla likwidacji związków toksycznych lub występujących w wysokiej koncentracji;
- adsorbery, wykorzystujące głównie węgiel aktywny, wykazują średnią do wysokiej skuteczność, lecz wymagają kosztownej regeneracji wkładu filtracyjnego; stosowane są do likwidacji zanieczyszczeń, które ze względu na toksyczność i koncentrację są szkodliwe dla mikroorganizmów;
- metoda absorpcji jest relatywnie kosztowna i może powodować przeniesienie problemu zanieczyszczonego powietrza na zanieczyszczenie wody; stosowana jest głównie tam, gdzie zamierza się odzyskiwać związki zanieczyszczające powietrze.

W opinii prof. Korneliusza Mikscha (Kierownik Katedry Biotechnologii Środowiskowej Politechniki Śląskiej w Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki), biofiltracja gazów jest me-



Fot. 2. Elementy instalacji do biofiltracji gazów

tołą preferowaną aktualnie na całym świecie ze względu na swe zalety w porównaniu z procesami fizycznymi i chemicznymi. Powoduje bowiem rzeczywistą likwidację zanieczyszczeń, a nie tylko zmianę miejsca ich występowania i nie prowadzi do gromadzenia niepożądanych odpadów.

LITERATURA

1. Adler S.F. 2001. Use these guidelines to scale up and design biofiltration processes for the control of volatile organic compounds. CEP, kwiecień 2001.
2. Bohn H.L. 1975. Soiland kompost filters of malodorant gases. JAPCA 25, 953.
3. Carlson D.A., Leiser C.P. 1966. Soil beds for the control of sewage odors, J. Wat. Poll. Contr. Fed. 38, 5, 829.
4. Cho K.-S., Hirai M., Shoda M. 1992. Enhanced removal efficiency of malodorous gases in a pilot-scale peat biofilter inoculated with *Thiobacillus thioparus* DW44. Journal of Fermentation and Bioengineering, 73 (1), 46–50.
5. Devinny J.S., Ramesh J. 2005. A phenomenological review of biofilter models. Chemical Engineering Journal 113, 187–196.
6. Dicks R.M.M., Ottengraf S.P.P. 1991. Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter. Bioprocess Eng., 93–99.
7. Don J.A., Feenstra L. 1984. Odour abatement through biofiltration. TNO, ref. no: 84-01343.
8. Eitner D. 1985. Abluftaufbereitung mit Biofiltern unter besonderer Berücksichtigung von Kompostfilteranlagen. Handbuch zur Müll- und Abfallbeseitigung, Erich Schmidt Verlag, no. 5, 1–16.
9. Furusawa N., Togashi I., Hirai M., Shoda M., Kubota H. 1984. Removal of hydrogen sulfide by a biofilter with fibrous peat. J. Ferment. Technol., 62, (6), 589–594.
10. Jorio H., Bibeau L., Viel G., Heitz M. 2000. Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performance. Chemical Engineering Journal 76, 209–221.
11. Kampbell D.H., Wilson J.T., Read H.W., Stockdale T.T. 1987. Removal of volatile aliphatic hydrocarbons in a soil bioreactor. JAPCA, 37, 10, 1236–1240.
12. Koch W., Angrick M. 1989. Neue Entwicklungen im Bereich der Biofiltertechnik. VDI- Berichte, no. 735, 349–355.
13. Koniecznyński J. 1993. Oczyszczanie gazów odlotowych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
14. Kośmider J., Mazur-Chrzanowska B., Wyszynski B. 2002. Odory. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
15. Martin F., Lehr R. 1996. Effect of period of non-use on biofilter performance, Journal of the Air and Waste Management Association, 46.
16. Namkoong W., Park J-S, VanderGheynst J.S., 2003. Biofiltration of gasoline vapor by compost media. Environmental Pollution 121, 181–187.
17. Otten L., Afzal M.T., Mainville D.M. 2004. Biofiltration of odours: laboratory studies using butyric acid. Advances in Environmental Research 8, 397–409.
18. Pawlaczyk-Szpilowa M. 1980. Mikrobiologia wody i ścieków. PWN, Warszawa, 83–87.
19. Prokop W.H., Bahn H.L. 1985. Soil bed system for control of reining plants odors. JAPCA, 35, 1332–1338.
20. Rands M.B., Cooper D.E., Woo C.P., Flether G.C., Rolfe K.A. 1981. Compost filter for H₂S removal from anaerobic digestion and rendering exhaust, JWPCF, 53 (2), 185–189.
21. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. z 18 września 2012 r., Poz. 1031, Warszawa 2012.
22. Sabo F. 1989. Praktische Erfahrungen mit Biofiltern zur Reduzierung geruchsintensiver Deponiegase. VDI- Berichte, no. 735, 293–312.
23. Suschka J. 2000. Złoza i filtry biologiczne. Wydawnictwo Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, 156.
24. Szklarczyk J., Czermamazowicz M. 1997. Biologiczne oczyszczanie gazów – stan obecny i perspektywy rozwoju. Biotechnologia, 108–116.
25. Szklarczyk M. 1991. Biologiczne oczyszczanie gazów odlotowych. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 4–7, 10–15, 26–28.
26. Szklarczyk M., Czermamazowicz M. 1996. Materiały IV Ogólnopolskiego Sympozjum nt. „Ochrona Powietrza w Przemysle”. Politechnika Łódzka, Łódź, 27-29 maja, 1996.
27. Twardowski T., Michalska A. 2000. Dylematy współczesnej biotechnologii z perspektywy biotechnologa i prawnika. Wyd. Dom Organizatora, Toruń.
28. VDI-Richtlinien 3477. 1991. Biologische Abgas/Abluftreinigung – Biofilter. Biological Waste Gas/Waste air Purification – biofilters. Düsseldorf.
29. Warych J. 1998. Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura. WNT, Warszawa, 455–458.
30. Zeisig H.D. 1985. Biofilter für Landwirtschaft und Industrien. VDI-Berichte, no. 561, 123–146.