

Ekologiczne technologie poprawy jakości powietrza – porównanie skuteczności biofiltru i bioskrubera w oczyszczaniu gazów odlotowych

Ecological air quality improvement technologies – comparison of biofilter and bioscrubber efficiency in waste gas treatment

MONIKA GAŁWA-WIDERA

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.10.05

Emisja zanieczyszczeń gazowych oraz substancji odorowych stanowi istotny problem środowiskowy związany z funkcjonowaniem instalacji gospodarki komunalnej, w szczególności kompostowni, oczyszczalni ścieków oraz zakładów przetwarzania odpadów. W odpowiedzi na rosnące wymagania dotyczące ochrony jakości powietrza coraz większe znaczenie zyskują technologie biologiczne oczyszczania gazów, charakteryzujące się wysoką skutecznością usuwania zanieczyszczeń oraz stosunkowo niskimi kosztami eksploatacyjnymi. Celem pracy było porównanie efektywności biofiltru z wypełnieniem torfowo-kompostowym oraz bioskrubera w oczyszczaniu gazów odlotowych powstających podczas kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki. Badania przeprowadzono w skali laboratoryjno-terenowej, analizując skuteczność usuwania siarkowodoru (H_2S), amoniaku (NH_3) oraz lotnych związków organicznych (LZO). Dodatkowo monitorowano parametry eksploatacyjne, takie jak temperatura, wilgotność, czas retencji gazu (EBRT) oraz obciążenie gazowe, i odnoszono je do efektywności procesu biologicznego oczyszczania. Uzyskane wyniki wykazały wysoką skuteczność obu analizowanych technologii. Średni stopień usuwania zanieczyszczeń wyniósł około 93% dla biofiltru oraz 96% dla bioskrubera. Wyższą efektywność bioskrubera zaobserwowano przy zmiennych obciążeniach gazowych oraz wysokiej wilgotności gazów procesowych, natomiast biofiltr pracował stabilnie i charakteryzował się prostszą konfiguracją technologiczną. Przeprowadzone badania potwierdziły, że obie technologie mogą być skutecznie stosowane do ograniczania emisji zanieczyszczeń gazowych i odorowych w procesach kompostowania odpadów organicznych. O wyborze technologii powinny decydować przede wszystkim rodzaj zanieczyszczeń, warunki eksploatacyjne instalacji oraz uwarunkowania ekonomiczne.

Słowa kluczowe: biofiltr, bioskruber, odory, LZO, siarkowodor, amoniak

The emission of gaseous pollutants and odorous compounds represents a significant environmental challenge associated with the operation of municipal waste management facilities, particularly composting plants, wastewater treatment plants, and waste processing facilities. In response to increasingly stringent air quality protection requirements, biological waste gas treatment technologies are gaining importance due to their high pollutant removal efficiency and relatively low operating costs. The aim of this study was to compare the performance of a biofilter containing a peat-compost-based packing material and a bioscrubber in treating waste gases generated during the composting of separately collected organic waste. The experiments were conducted on a laboratory-pilot scale, focusing on the removal efficiency of hydrogen sulfide (H_2S), ammonia (NH_3), and volatile organic compounds (VOCs). In addition, key operational parameters, including temperature, humidity, empty bed residence time (EBRT), and gas loading rate, were monitored and evaluated in relation to the efficiency of the biological gas treatment processes. The results demonstrated high removal efficiencies for both technologies. The average pollutant removal efficiency reached approximately 93% for the biofilter and 96% for the bioscrubber. The bioscrubber exhibited higher removal efficiency under fluctuating gas loading conditions and high process gas humidity, whereas the biofilter maintained stable performance and featured a simpler technological configuration. The findings confirmed that both technologies can be effectively applied to reduce gaseous pollutant and odor emissions generated during the composting of organic waste. The selection of an appropriate treatment technology should primarily depend on the characteristics of the pollutants, the operating conditions of the installation, and economic considerations.

Keywords: biofilter, bioscrubber, composting, volatile organic compounds (VOCs), activated sludge inoculation

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się systematyczny wzrost wymagań dotyczących ograniczania emisji zanieczyszczeń do atmosfery, wynikający zarówno z zaostrzających się regulacji krajowych i unijnych, jak i z rosnącej świadomości społecznej dotyczącej wpływu jakości powietrza na zdrowie ludzi oraz stan środowiska. Szczególną uwagę zwraca się na emisję substancji odorowych oraz lotnych związków organicznych (LZO, ang. Volatile Organic Compounds – VOCs), które, oprócz uciążliwości zapachowej, uczestniczą w procesach prowadzących do powstawania wtórnych zanieczyszczeń atmosferycznych, w tym ozonu troposferycznego oraz wtórnego aerozolu organicznego. Wiele związków należących do tej grupy wykazuje działanie drażniące, toksyczne lub kancerogenne, a długotrwała ekspozycja może prowadzić do pogorszenia jakości życia oraz zwiększenia ryzyka chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego [1, 5, 7].

Do głównych źródeł emisji zanieczyszczeń gazowych należą oczyszczalnie ścieków, kompostownie, instalacje mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych, składowiska odpadów, zakłady przemysłu spożywczego, chemicznego i petrochemicznego oraz instalacje przetwarzania biomasy. W tych procesach emitowane są przede wszystkim siarkowodor (H_2S), amoniak (NH_3), merkaptany, siarczki organiczne, aldehydy, ketony oraz lotne związki organiczne, których skład ilościowy i jakościowy zależy od rodzaju procesu technologicznego oraz właściwości przetwarzanego materiału [2-5].

Stosowane od wielu lat metody fizykochemiczne, takie jak absorpcja, adsorpcja, spalanie termiczne, utlenianie katalityczne czy kondensacja, umożliwiają osiągnięcie wysokiej skuteczności oczyszczania gazów, jednak ich wykorzystanie wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi, znacznym zużyciem energii oraz koniecznością stosowania reagentów chemicznych i zagospodarowania produktów ubocznych. W przypadku gazów o niskim stężeniu zanieczyszczeń oraz dużych strumieni przepływu technologie te stają się często nieopłacalne ekonomicznie [1, 5, 7].

Alternatywę stanowią biologiczne technologie oczyszczania gazów wykorzystujące zdolność mikroorganizmów do biodegradacji związków organicznych i nieorganicznych. Proces biologicznego oczyszczania obejmuje adsorpcję lub absorpcję zanieczyszczeń, ich transport do warstwy biologicznej oraz utlenianie do dwutlenku węgla, wody, soli mineralnych

i nowej biomasy. Rozwiązania te charakteryzują się niewielkim zużyciem energii, ograniczoną ilością odpadów wtórnych oraz wysoką efektywnością usuwania związków odorowych, dzięki czemu wpisują się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego rozwoju [3, 5-8].

Do najczęściej wykorzystywanych biologicznych metod oczyszczania gazów należą biofiltry, bioskrubery oraz biofiltry zraszane (biotrickling filters). Biofiltry wykorzystują stałe złoża biologiczne zasiedlone przez mikroorganizmy, w którym jednocześnie zachodzą procesy sorpcji oraz biodegradacji zanieczyszczeń. Najczęściej stosowanymi materiałami filtracyjnymi są kompost, torf, zrębki drzewne oraz ich mieszaniny, zapewniające odpowiednią porowatość, retencję wilgoci oraz warunki rozwoju mikroflory. Bioskrubery pracują natomiast w układzie absorpcyjno-biologicznym, w którym zanieczyszczenia są najpierw pochłaniane przez ciecz roboczą, a następnie biodegradowane w bioreaktorze. Technologia ta wykazuje szczególnie wysoką skuteczność usuwania związków dobrze rozpuszczalnych w wodzie, takich jak H_2S czy NH_3 , oraz zapewnia większą stabilność pracy przy zmiennych obciążeniach gazowych [3-9].

Efektywność obu technologii zależy od wielu parametrów eksploatacyjnych, w tym czasu retencji gazu (EBRT), wilgotności materiału filtracyjnego, temperatury, wartości pH, rodzaju materiału filtracyjnego, aktywności mikroorganizmów oraz obciążenia zanieczyszczeniami. W literaturze podkreśla się, że odpowiedni dobór tych parametrów warunkuje zarówno skuteczność usuwania zanieczyszczeń, jak i długotrwałą stabilność pracy instalacji biologicznych [1, 3, 5, 7, 8].

Pomimo dynamicznego rozwoju biologicznych metod oczyszczania powietrza oraz rosnącej liczby wdrożeń przemysłowych, nadal stosunkowo niewiele jest badań umożliwiających bezpośrednie porównanie biofiltrów i bioskruberów prowadzonych w porównywalnych warunkach eksploatacyjnych. Większość publikacji koncentruje się na pojedynczych technologiach lub wybranych grupach zanieczyszczeń, co utrudnia jednoznaczną ocenę i porównanie [2-9].

Oryginalność przedstawionych badań polega na bezpośrednim porównaniu biofiltru z wypełnieniem torfowo-kompostowym oraz bioskrubera, pracujących w porównywalnych warunkach eksploatacyjnych, przy oczyszczaniu rzeczywistych gazów odlotowych z procesu kompostowania odpadów organicznych. Dodatkowym elementem metodycznym było zastosowanie tego samego źródła

inokulum w obu układach, co ujednoliciło sposób zaszczepienia biomasy i ograniczyło wpływ różnic w inokulacji na porównanie technologii.

Cel pracy

Celem niniejszej pracy było porównanie efektywności dwóch biologicznych technologii oczyszczania gazów odlotowych powstających podczas kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki, tj. biofiltru z wypełnieniem torfowo-kompostowym oraz bioskrubera. Badania przeprowadzono w skali laboratoryjno-terenowej z wykorzystaniem rzeczywistych gazów odlotowych, co umożliwiło odwzorowanie warunków eksploatacyjnych występujących w instalacjach kompostowania przy jednoczesnej kontroli podstawowych parametrów technologicznych.

Zakres badań obejmował ocenę skuteczności usuwania głównych zanieczyszczeń gazowych i substancji odorowych emitowanych podczas procesu kompostowania, w szczególności amoniaku (NH_3), siarkowodoru (H_2S) oraz lotnych związków organicznych (LZO). Monitorowano również podstawowe parametry eksploatacyjne, takie jak temperatura, wilgotność, wartość pH, czas kontaktu gazu ze złożem biologicznym (EBRT) oraz natężenie przepływu gazu, i odnoszono je do efektywności procesu oczyszczania.

Badania przeprowadzono w trzech niezależnych seriach pomiarowych dla każdej z analizowanych technologii. W każdej serii wykonywano pomiary stężeń zanieczyszczeń na dopływie i odpływie z instalacji, co umożliwiło określenie skuteczności ich usuwania oraz ocenę zmienności wyników. Biofiltr wyposażono w naturalne wypełnienie torfowo-kompostowe, stanowiące środowisko rozwoju mikroorganizmów odpowiedzialnych za biodegradację zanieczyszczeń gazowych. Bioskruber pracował w układzie absorpcyjno-biologicznym, w którym zanieczyszczenia były najpierw absorbowane przez ciecz procesową, a następnie rozkładane przez mikroorganizmy.

Celem szczegółowym pracy było określenie wpływu zastosowanej technologii na skuteczność redukcji zanieczyszczeń gazowych oraz porównanie stabilności pracy obu instalacji w warunkach zmiennego składu gazów odlotowych powstających podczas kompostowania odpadów organicznych. Analizie poddano również wymagania eksploatacyjne obu układów związane z utrzymaniem odpowiedniej wilgotności złoża lub cieczy procesowej, a w przypadku bioskrubera także z recykulacją cieczy i napowietrzaniem bioreaktora.

Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę przydatności biofiltru z wypełnieniem torfowo-kompostowym oraz bioskrubera do ograniczania emisji zanieczyszczeń gazowych i substancji odorowych z instalacji kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki oraz na porównanie obu technologii pod względem efektywności oczyszczania i parametrów eksploatacyjnych.

Materiały i metody badań

Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na dwóch instalacjach biologicznego oczyszczania gazów: biofiltrze z wypełnieniem torfowo-kompostowym oraz bioskruberze. Obie instalacje pracowały w zbliżonych warunkach hydrauliczno-przepływowych i były zasilane gazami powstającymi podczas kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki. Przyjęte parametry pracy instalacji dobrano na podstawie danych literaturowych dotyczących biologicznego oczyszczania gazów odorowych, w których za kluczowe czynniki warunkujące skuteczność uznaje się czas kontaktu gazu z biomasą, wilgotność, wartość pH, temperaturę oraz obciążenie zanieczyszczeniami [1, 5, 7, 10, 14, 15].

W przypadku biofiltru zastosowano wypełnienie torfowo-kompostowe, stanowiące naturalne środowisko rozwoju mikroorganizmów odpowiedzialnych za sorpcję i biodegradację zanieczyszczeń gazowych. Zakładany czas retencji gazu w złożu, wyrażony jako EBRT, przyjęto w zakresie 30-60 s, co odpowiada typowym wartościom stosowanym w biofiltracji gazów zawierających H_2S , NH_3 oraz LZO [1, 5, 7, 10]. Wilgotność złoża utrzymywano na poziomie około 40-60%, ponieważ zbyt niska wilgotność ogranicza aktywność mikroorganizmów, natomiast nadmierne uwodnienie może powodować wzrost oporów przepływu i powstawanie stref beztlenowych [1, 10, 13]. Odczyn wypełnienia utrzymywano w zakresie zbliżonym do obojętnego, tj. pH 6,5-7,5, co sprzyja aktywności mikroorganizmów heterotroficznych i autotroficznych uczestniczących w rozkładzie związków odorowych [5, 10, 12].

Bioskruber pracował w układzie absorpcyjno-biologicznym, w którym zanieczyszczenia gazowe były najpierw absorbowane w cieczy roboczej, a następnie rozkładane biologicznie przez mikroorganizmy obecne w zawiesinie. Dla bioskrubera przyjęto ciągłą recyrkulację cieczy procesowej, kontrolę pH w zakresie 6,5-8,0 oraz temperaturę pracy zbliżoną do warunków mezofilowych, tj. 20-30°C.

Takie parametry są zgodne z ogólnym trendem stosowanym w biologicznych układach oczyszczania powietrza, w których stabilność pracy zależy od utrzymania odpowiednich warunków rozwoju mikroorganizmów oraz skutecznego przenoszenia zanieczyszczeń z fazy gazowej do fazy ciekłej [3, 7, 10, 16].

Zakres badań obejmował pomiar stężeń siarkowodoru (H_2S), amoniaku (NH_3), lotnych związków organicznych (LZO), temperatury, wilgotności, pH, spadku ciśnienia oraz czasu retencji gazu (EBRT). Wybór tych wskaźników wynikał z charakterystyki gazów emitowanych podczas kompostowania odpadów organicznych, w których szczególne znaczenie mają związki azotu, siarki oraz lotne związki organiczne odpowiedzialne za uciążliwość zapachową [4, 5, 9].

W odróżnieniu od wielu rozwiązań opisywanych w literaturze, w niniejszych badaniach obie instalacje zaszczerpiono osadem czynnym pochodzącym z biologicznego oczyszczania ścieków. W przypadku biofiltru osad czynny wykorzystano do inokulacji złoża torfowo-kompostowego, natomiast w bioskruberze stanowił on źródło aktywnej biomasy w cieczy procesowej. Takie rozwiązanie miało na celu skrócenie fazy adaptacji mikroorganizmów, zwiększenie różnorodności mikrobiologicznej układu oraz poprawę stabilności procesu biodegradacji zanieczyszczeń gazowych. Zastosowanie inokulacji materiału filtracyjnego lub układu biologicznego jest zgodne z kierunkiem badań nad intensyfikacją metod biologicznego oczyszczania gazów odorowych, szczególnie w przypadku jednoczesnego usuwania H_2S , NH_3 i LZO [4, 5, 10]. W tabeli 1 przedstawiono parametry pracy obu instalacji.

Przyjęte założenia metodyczne umożliwiały porównanie obu technologii zasilanych równolegle gazami z tego samego procesu kompostowania i przy jednakowym natężeniu przepływu. Zastosowanie tego samego źródła inokulum w obu układach ujednoliciło sposób zaszczepienia biomasy. Ze względu na brak wariantów kontrolnych bez inokulacji badania nie pozwalają jednak na ilościową ocenę wpływu samej inokulacji na skuteczność procesu.

Biofiltr

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem biofiltru pracującego w skali laboratoryjno-terenowej, przeznaczonego do biologicznego oczyszczania gazów odlotowych powstających podczas kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki. Instalację zaprojektowano jako pionowy biofiltr o przepływie współprądowym, umożliwiający równomierny rozdział gazów na całej powierzchni złoża biologicznego.

Kolumna biofiltru została wykonana z przezroczystego tworzywa PMMA, co umożliwiało kontrolę stanu złoża podczas prowadzenia doświadczeń. Średnica wewnętrzna kolumny wynosiła 0,20 m, natomiast całkowita wysokość wynosiła 1,50 m. Efektywna wysokość warstwy filtracyjnej wynosiła 1,00 m, co odpowiadało objętości roboczej złoża około 31,4 dm³.

Jako materiał filtracyjny zastosowano mieszaninę torfu wysokiego, dojrzałego kompostu oraz zrębków drzewnych w stosunku objętościowym 40 : 40 : 20. Dobór materiałów wynikał z ich korzystnych właściwości fizycznych i biologicznych.

Tabela 1. Założenia parametrów pracy instalacji
Table 1. Assumptions regarding system operating parameters

Parametr	Biofiltr z wypełnieniem torfowo-kompostowym	Bioskruber
Skala badań	Laboratoryjno-terenowa	Laboratoryjno-terenowa
Liczba prób	3 serie pomiarowe po 5 prób	3 serie pomiarowe po 5 prób
Źródło gazów	Kompostowanie odpadów organicznych z selektywnej zbiórki	Kompostowanie odpadów organicznych z selektywnej zbiórki
Zakładany zakres EBRT / czas kontaktu	30–60 s	30–60 s
Temperatura pracy	20–30°C	20–30°C
Wilgotność złoża / układu	40–60% wilgotności złoża	Ciecz robocza w recyrkulacji
pH	6,5–7,5	6,5–8,0
Wypełnienie / medium	Torf + kompost + zrębki (40:40:20, v/v)	Ciecz robocza z biomasą
Inokulacja	Osad czynny	Osad czynny
Badane zanieczyszczenia	H_2S , NH_3 , LZO	H_2S , NH_3 , LZO
Parametry kontrolne	Temperatura, wilgotność, pH, spadek ciśnienia, EBRT	Temperatura, pH, przepływ gazu, recyrkulacja cieczy

Torf zapewniał wysoką retencję wilgoci oraz odpowiednie warunki rozwoju mikroorganizmów, kompost stanowił naturalne źródło mikroflory odpowiedzialnej za biodegradację zanieczyszczeń, natomiast zrębki drzewne poprawiały porowatość złoża, ograniczały jego zagęszczanie oraz zmniejszały spadek ciśnienia podczas przepływu gazów.

Kompost pochodził z instalacji kompostowania selektywnie zebranych odpadów zielonych i biodegradowalnych.

Przed rozpoczęciem badań materiał filtracyjny został zaszczipiony osadem czynnym pobranym z komory napowietrzania komunalnej oczyszczalni ścieków. Inokulację przeprowadzono poprzez równomierne naniesienie zawiesiny osadu czynnego na całą wysokość złoża. Następnie biofiltr pozostawiono na okres adaptacji mikroorganizmów wynoszący 7 dni przy utrzymywaniu odpowiedniej wilgotności i zapewnieniu ciągłego przepływu powietrza.

Tabela 2. Parametry pracy biofiltru
Table 2. Biofilter operating parameters

Parametr	Wartość
Typ biofiltru	Pionowy, przepływ współprądowy
Skala badań	Laboratoryjno-terenowa
Średnica kolumny	0,20 m
Wysokość całkowita	1,50 m
Wysokość złoża	1,00 m
Objętość robocza złoża	31,4 dm ³
Materiał filtracyjny	Torf : kompost : zrębki = 40 : 40 : 20
Inokulum	Osad czynny z komunalnej oczyszczalni ścieków
Wilgotność złoża	45–60%
Temperatura pracy	20–25°C
pH złoża	6,8–7,4
EBRT	45 s
Przepływ gazu	2,5 m ³ ·h ⁻¹
System nawilżania	Automatyczne zraszanie
Dystrybucja gazów	Perforowany dystrybutor
Odprowadzenie kondensatu	Perforowane dno + zbiornik kondensatu

Gazy procesowe doprowadzano od dołu kolumny przez perforowany dystrybutor zapewniający równomierny rozdział strumienia gazów na całą powierzchnię biofiltru. Oczyszczone powietrze odprowadzano z górnej części instalacji.

Wilgotność złoża utrzymywano na poziomie 45-60% za pomocą automatycznego systemu zraszania wyposażonego w dysze mgłowe rozmieszczone nad powierzchnią materiału filtracyjnego. Nadmiar cieczy odprowadzano przez

perforowane dno biofiltru do zbiornika kondensatu.

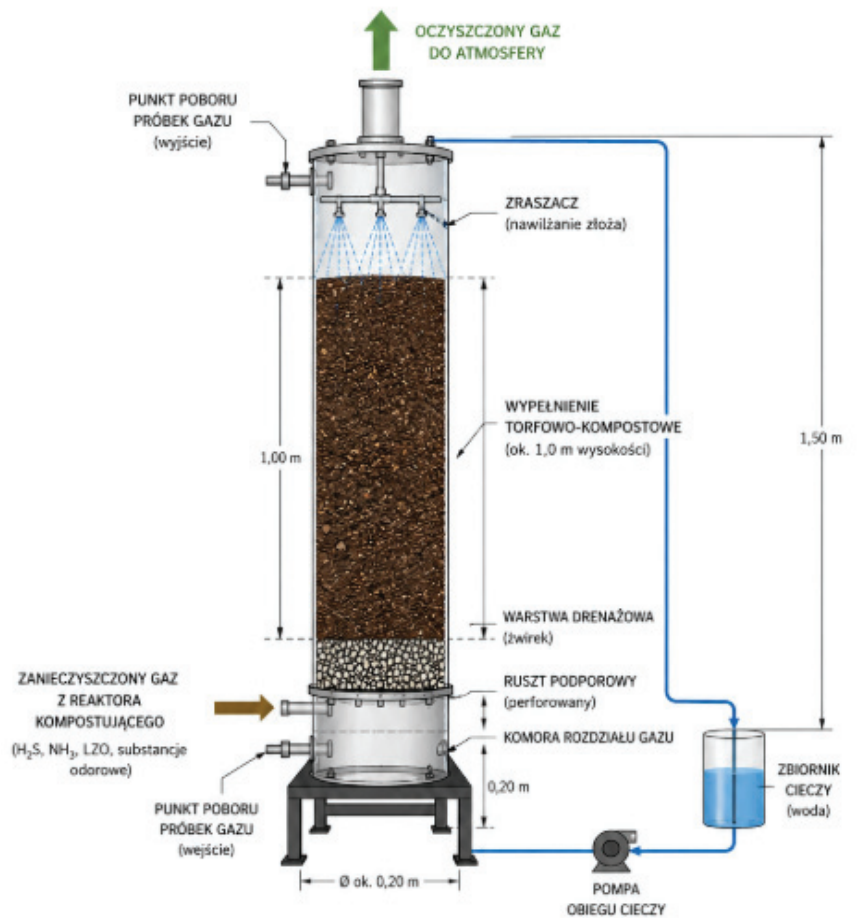
Parametry pracy instalacji monitorowano w sposób ciągły. Temperaturę złoża utrzymywano w zakresie 20-25°C, wartość pH materiału filtracyjnego wynosiła 6,8-7,4, natomiast czas kontaktu gazu ze złożem (EBRT) utrzymywano na poziomie około 45 s, zgodnym z zaleceniami literaturowymi dotyczącymi oczyszczania gazów zawierających amoniak, siarkowodor oraz lotne związki organiczne.

Podczas badań kontrolowano również spadek ciśnienia na złożu, wilgotność materiału filtracyjnego oraz natężenie przepływu gazów, co umożliwiło ocenę stabilności pracy biofiltru oraz interpretację skuteczności procesu biodegradacji w odniesieniu do warunków eksploatacyjnych.

Gaz procesowy przepływa od dolnej części biofiltru ku górze przez materiał filtracyjny zasiedlony mikroorganizmami. W trakcie przepływu zanieczyszczenia ulegają adsorpcji na wilgotnym materiale filtracyjnym, a następnie biodegradacji. Nadmiar cieczy odprowadzany jest do zbiornika kondensatu, natomiast oczyszczone powietrze opuszcza instalację przez króciec wylotowy.

Bioskruber

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem bioskrubera pracującego w skali laboratoryjno-terenowej, przeznaczonego do biologicznego oczyszczania gazów odlotowych powstających podczas kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki. Instalacja pracowała w układzie absorpcyjno-biologicznym, w którym zanieczyszczenia gazowe były najpierw absorbowane w cieczy roboczej, a następnie biodegradowane przez mikroorganizmy rozwijające się w bioreaktorze. Kolumnę absorpcyjną wykonano z przezroczystego tworzywa PMMA o średnicy wewnętrznej 0,15 m oraz wysokości całkowitej 1,50 m. Całą wysokość kolumny wypełniono pierścieniami Raschiga wykonanymi z polipropylenu o powierzchni właściwej około 250 m²·m⁻³, zapewniającymi rozwiniętą powierzchnię kontaktu pomiędzy fazą gazową i ciekłą oraz wysoką skuteczność procesu absorpcji zanieczyszczeń. Wysokość czynnej warstwy wypełnienia wynosiła 1,50 m, co przy średnicy wewnętrznej kolumny 0,15 m odpowiadało objętości czynnej strefy kontaktu gaz–ciecz V = 0,0265 m³.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego biofiltru do oczyszczania gazów odlotowych z procesu kompostowania
Fig. 1. Schematic of a laboratory-scale biofilter for treating off-gases from the composting process

Objętość cieczy roboczej wynosiła 25 dm³ i była magazynowana w zbiorniku reflowym wykonanym z polietylenu. Ciecz robocza była w sposób ciągły tłoczona na szczyt kolumny absorpcyjnej, skąd równomiernie spływała po powierzchni wypełnienia, zapewniając intensywny kontakt z przepływającym przeciwnie do gazu procesowym.

Układ wyposażono w zamknięty system recykulacji cieczy roboczej z pompą obiegową o wydajności 0,3 m³·h⁻¹, umożliwiającą utrzymanie stabilnych warunków procesu oraz równomierne zwilżanie wypełnienia. Natężenie przepływu cieczy dobrano tak, aby zapewnić skuteczną absorpcję zanieczyszczeń przy jednoczesnym ograniczeniu strat hydraulicznych.

Bioreaktor stanowił zbiornik recykulacyjny o objętości roboczej 20 dm³, wyposażony w system napowietrzania drobnopęcherzykowego zapewniający odpowiednie warunki tlenowe dla rozwoju mikroorganizmów odpowiedzialnych za biodegradację zaabsorbowanych zanieczyszczeń. Do napowietrzania zastosowano dyfuzor membranowy zasilany dmuchawą membranową, co pozwalało utrzymać stężenie tlenu rozpuszczonego na poziomie 2-4 mg·dm⁻³.

Podobnie jak w przypadku biofiltru, układ biologiczny został zaszczerpiony osadem czynnym pobranym z komunalnej oczyszczalni ścieków. Osad wprowadzono bezpośrednio do cieczy roboczej bioreaktora, a następnie prowadzono siedmiodniowy okres adaptacji mikroorganizmów przed rozpoczęciem właściwych badań. Zastosowanie inokulacji miało na celu skrócenie fazy rozruchu biologicznego oraz zwiększenie aktywności mikrobiologicznej w układzie.

Tabela 3. Parametry pracy bioskrubera
Table 3. Bioscrubber operating parameters

Parametr	Wartość
Typ instalacji	Bioskruber absorpcyjno-biologiczny
Skala badań	Laboratoryjno-terenowa
Średnica kolumny	0,15 m
Wysokość kolumny	1,50 m
Wypełnienie kolumny	Pierścienie Raschiga PP
Powierzchnia właściwa wypełnienia	ok. 250 m ² ·m ⁻³
Objętość cieczy roboczej	25 dm ³
Objętość bioreaktora	20 dm ³
Recykulacja cieczy	0,3 m ³ ·h ⁻¹
Napowietrzanie	Dyfuzor drobnopęcherzykowy
Tlen rozpuszczony	2-4 mg·dm ⁻³
Temperatura pracy	20-25 °C
pH cieczy	6,8-7,5
EBRT	38,2 s
Przepływ gazu	2,5 m ³ ·h ⁻¹
Inokulum	Osad czynny z komunalnej oczyszczalni ścieków

Temperaturę cieczy roboczej utrzymywano w zakresie 20-25 °C, natomiast wartość pH kontrolowano w zakresie 6,8-7,5, co zapewniało warunki sprzyjające procesom biodegradacji. Natężenie przepływu gazu utrzymywano na poziomie 2,5 m³·h⁻¹, co przy objętości czynnej kolumny wynoszącej 0,0265 m³ odpowiadało wartości EBRT około 38 s. Czas retencji gazu był zbliżony do tego zastosowanego w biofiltrze (około 45 s) i umożliwiał porównanie skuteczności obu technologii w porównywalnych warunkach eksploatacyjnych.

Podczas badań monitorowano stężenia siarkowodoru (H₂S), amoniaku (NH₃), lotnych związków organicznych (LZO), temperaturę, wartość pH, natężenie przepływu gazu, natężenie recykulacji cieczy, zawartość tlenu rozpuszczonego oraz spadek ciśnienia w kolumnie absorpcyjnej.

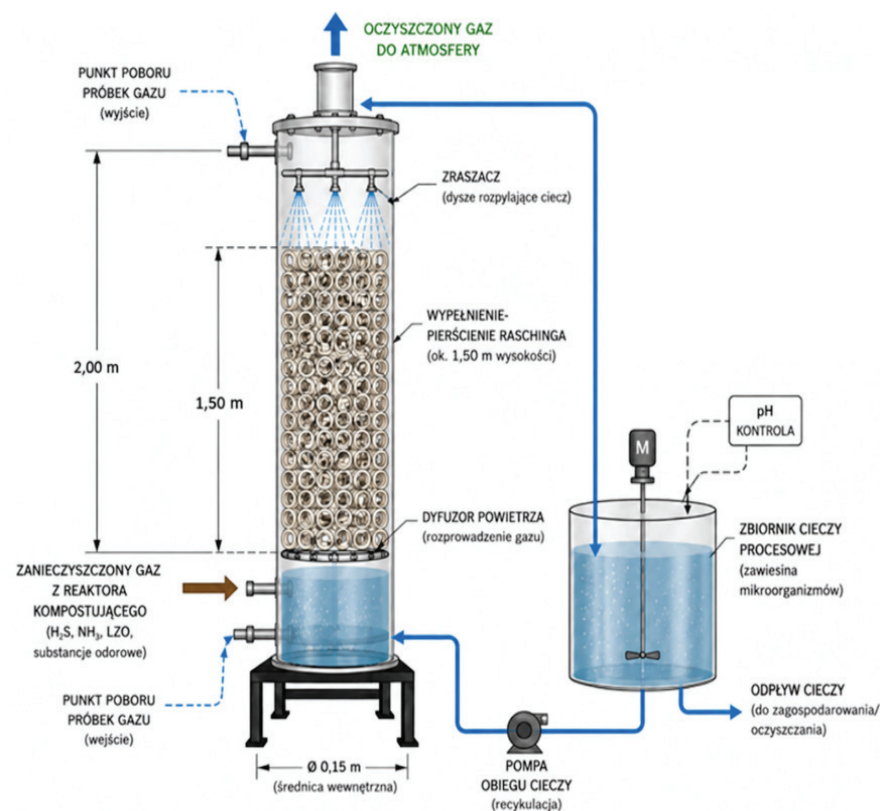
Gaz procesowy przepływa przeciwnie do przepływu cieczy, gdzie zanieczyszczenia są pochłaniane przez ciecz roboczą. Następnie ciecz kierowana jest do bioreaktora, w którym dzięki aktywności mikroorganizmów zaszczerpionych osadem czynnym następuje biodegradacja zaabsorbowanych związków. Zregenerowana ciecz jest zwracana do kolumny absorpcyjnej w układzie recykulacji, zapewniając ciągłość procesu oczyszczania.

Metody analityczne

Oceny efektywności biologicznego oczyszczania gazów dokonano na podstawie oznaczeń stężeń wybranych zanieczyszczeń gazowych oraz parametrów fizykochemicznych wpływających na przebieg procesu biodegradacji. Pomiary prowadzono równocześnie na dopływie i odpływie z obu instalacji, co umożliwiło określenie skuteczności usuwania poszczególnych związków oraz ocenę stabilności pracy biofiltru i bioskrubera [3-5, 7].

Badania przeprowadzono w trzech niezależnych seriach pomiarowych dla każdej instalacji. Każda seria obejmowała pięć pomiarów wykonywanych w odstępach dwudniowych, a wszystkie analizy prowadzono w trzech powtórzeniach. Do opracowania wyników przyjęto wartości średnie, które wykorzystano do obliczenia skuteczności usuwania zanieczyszczeń oraz pozostałych wskaźników technologicznych [4-7].

Stężenie siarkowodoru (H₂S) oznaczano metodą elektrochemiczną z wykorzystaniem przenośnego analizatora gazowego wyposażonego w selektywny sensor H₂S. Stężenie amoniaku (NH₃) oznaczano analogiczną metodą przy użyciu elektrochemicznego sensora NH₃. Sumaryczne stężenie lotnych związków organicznych (LZO) oznaczano metodą fotjonizacji (PID),



Rys. 2. Schemat laboratoryjnego bioskrubera do oczyszczania gazów odlotowych z procesu kompostowania
Fig. 2. Schematic diagram of a laboratory-scale bioscrubber for treating off-gases from the composting process

a wyniki wyrażano jako równoważnik izobutyleny. Zastosowane metody należą do najczęściej wykorzystywanych technik monitorowania gazów odorowych w badaniach laboratoryjnych i pilotażowych oraz zapewniają możliwość prowadzenia pomiarów w czasie rzeczywistym [3,5-7].

Temperaturę gazów, temperaturę złoża biofiltracyjnego oraz cieczy roboczej bioskrubera oznaczano przy użyciu cyfrowych czujników temperatury umieszczonych w wyznaczonych punktach instalacji. Wilgotność względną gazów mierzono elektronicznym higrometrem, natomiast wilgotność materiału filtracyjnego biofiltru określano metodą wagową zgodnie z procedurami stosowanymi dla materiałów organicznych [10,14].

Wartość pH materiału filtracyjnego oraz cieczy procesowej oznaczano metodą potencjometryczną z zastosowaniem laboratoryjnego pH-metru wyposażonego w elektrodę kombinowaną. Przewodność elektrolityczną cieczy roboczej bioskrubera oraz wyciągów wodnych z materiału filtracyjnego biofiltru oznaczano metodą konduktometryczną z automatyczną kompensacją temperatury. Parametry te wykorzystano do oceny zmian właściwości środowiska biologicznego podczas eksploatacji instalacji [5,10,12,14].

Podczas całego okresu badań monitorowano również natężenie przepływu gazów, czas retencji gazu (EBRT), spadek ciśnienia na biofiltrze i kolumnie absorpcyjnej bioskrubera oraz temperaturę otoczenia. Parametry te stanowiły podstawę oceny warunków hydraulicznych pracy obu instalacji oraz interpretacji uzyskanych wyników skuteczności oczyszczania [1,3,5,7].

Szczegółowy zakres oznaczeń, zastosowane metody analityczne, aparaturę pomiarową oraz jednostki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Metody oznaczeń zastosowane podczas badań
Table 4. Analytical methods used during the study

Oznaczany parametr	Metoda oznaczenia	Jednostka	Aparatura
Siarkowodor (H ₂ S)	Metoda elektrochemiczna	ppm, mg·m ⁻³	Analizator typu SR2-DO produkcji niemieckiej przystosowany do pomiaru stężeń 6 gazów (CH ₄ , CO ₂ , CO, O ₂ , H ₂ S i NH ₃)
Amoniak (NH ₃)	Metoda elektrochemiczna	ppm, mg·m ⁻³	Analizator typu SR2-DO produkcji niemieckiej przystosowany do pomiaru stężeń 6 gazów (CH ₄ , CO ₂ , CO, O ₂ , H ₂ S i NH ₃)
Lotne związki organiczne (LZO)	Detektor fotojonizacyjny (PID)	ppm, mg·m ⁻³	Przenośny analizator PID, lampa 10,6 eV
Temperatura gazu	Czujnik temperatury	°C	Termometr cyfrowy
Temperatura złoża	Czujnik temperatury	°C	Termometr cyfrowy
Wilgotność względna gazu	Higrometr elektroniczny	%	Testo 635
Wilgotność złoża	Metoda wagowa	%	–
pH	Metoda potencjometryczna	–	pH-metr Elmetron CP-401
Przewodność elektrolityczna	Metoda konduktometryczna	mS·cm ⁻¹	konduktometr
Natężenie przepływu gazu	Przepływomierz	m ³ ·h ⁻¹	rotametr
EBRT	Obliczenia na podstawie objętości złoża i przepływu gazu	s	–

Wszystkie analizy prowadzono zgodnie z zaleceniami producentów aparatury pomiarowej oraz obowiązującymi procedurami analitycznymi stosowanymi w badaniach nad biologicznymi metodami oczyszczania gazów. Przed rozpoczęciem pomiarów aparatura została skalibrowana przy użyciu gazów wzorcowych oraz certyfikowanych roztworów odniesienia, co zapewniło odpowiednią dokładność i powtarzalność wyników.

Obliczenia

Ocenę efektywności pracy biofiltru oraz bioskrubera przeprowadzono na podstawie wskaźników powszechnie stosowanych w badaniach biologicznych metod oczyszczania gazów, obejmujących skuteczność usuwania zanieczyszczeń (Removal Efficiency – RE), obciążenie zanieczyszczeniami (Inlet Loading Rate – IL), zdolność eliminacji zanieczyszczeń (Elimination Capacity – EC) oraz czas retencji gazu (Empty Bed Residence Time – EBRT). Parametry te stanowią podstawę oceny pracy biofiltrów, bioskrubarów oraz biofiltrów zraszanych i są powszechnie wykorzystywane do porównywania efektywności różnych technologii biologicznego oczyszczania gazów.

Efektywność pracy biofiltru oraz bioskrubera oceniono na podstawie wskaźników: RE, IL, EC oraz EBRT.

Wartości IL i EC przedstawione w tabelach 5a-7 obliczono na podstawie sumy stężeń H₂S, NH₃ i LZO po przeliczeniu stężeń z mg·m⁻³ na g·m⁻³.

Skuteczność usuwania (1)

$$RE = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100\% \quad (1)$$

RE – skuteczność usuwania (%), C_{in} – stężenie na dopływie (g·m⁻³), C_{out} – stężenie na odpływie (g·m⁻³) [10,11].

Obciążenie zanieczyszczeniami (2)

$$IL = (Q \times C_{in}) / V \quad (2)$$

IL – obciążenie zanieczyszczeniami (g·m⁻³·h⁻¹), Q – przepływ gazu (m³·h⁻¹), V – objętość robocza (m³) [13-14].
Zdolność eliminacji (3)

$$EC = Q \times (C_{in} - C_{out}) / V \quad (3)$$

EC – zdolność eliminacji (g·m⁻³·h⁻¹) [13-14].

Czas retencji gazu (4)

$$EBRT = V / Q \cdot 3600 \quad (4)$$

EBRT – czas retencji gazu (s) [10,13].

Wyniki badań

Badania przeprowadzono w okresie letnim. Dla każdej instalacji wykonano trzy serie pomiarowe, a w każdej serii pięć pomiarów w odstępach dwudniowych. Obie instalacje zasilano równolegle gazami pochodzącymi z tego samego procesu kompostowania, przy jednakowym natężeniu przepływu gazu. Stężenia zanieczyszczeń na dopływie oznaczano oddzielnie dla każdej instalacji, uwzględniając ich chwilową zmienność. W obliczeniach przyjęto natężenie przepływu gazu Q = 2,5 m³·h⁻¹ Q = 2,5 m³·h⁻¹. Dla biofiltru zastosowano objętość czynnej złoża V = 0,0314 m³ V_{BF} = 0,0314 m³, natomiast dla bioskrubera objętość czynnej strefy kontaktu gaz–ciecz V = 0,0265 m³ V_{BS} = 0,0265 m³.

Analiza statystyczna

Wyniki przedstawiono jako średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe (SD), współczynnik zmienności (CV) oraz wartości minimalne i maksymalne. Dla każdej technologii uwzględniono łącznie 15 wyników (n=15). Średnia skuteczność usuwania zanieczyszczeń wyniosła 92,76 ± 0,38% dla biofiltru oraz 96,73 ± 0,33% dla bioskrubera. Współczynnik zmienności wyniósł odpowiednio 0,41% i 0,34%. Normalność rozkładu zweryfikowano testem Shapiro–Wilka; nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności dla biofiltru (W = 0,968; p = 0,832) ani bioskrubera (W = 0,977; p = 0,943). Do porównania średnich zastosowano test t Welcha dla prób niezależnych. Wykazano istotnie wyższą skuteczność bioskrubera (t = -23,01; df = 27,44; p < 0,001). Różnica średnich wyniosła 2,97 punktu procentowego. p = 0,832p = 0,943t = -23,01 df = 27,44p < 0,0001

Uzyskane wyniki wskazują, że w warunkach letnich obie instalacje pracowały stabilnie przy obserwowanym obciążeniu zanieczyszczeniami. Nieznacznie wyższa efektywność bioskrubera może

wynikać z intensywniejszego transportu masy do fazy ciekłej, stałej recyrkulacji cieczy roboczej oraz łatwiejszego utrzymania warunków pH i natlenienia biomasy. Wysoka skuteczność biofiltru z wypełnieniem torfowo-kompostowym może być związana z korzystną strukturą złoża, dobrą retencją wilgoci oraz zaszczepieniem osadem czynnym, co mogło skrócić fazę adaptacji mikroorganizmów i zwiększyć aktywność biologiczną układu.

Porównanie technologii

Pomiary prowadzono w okresie letnim, w odstępach dwudniowych, w trzech seriach pomiarowych obejmujących po pięć pomiarów dla każdej instalacji. Stopień usunięcia zanieczyszczeń (RE) wyznaczono oddzielnie dla H₂S, NH₃ i LZO oraz jako średnią ważoną na podstawie sumarycznego stężenia zanieczyszczeń gazowych. W tabelach 5a-6b stężenia H₂S, NH₃ i LZO podano w mg·m⁻³, wartości IL i EC w g·m⁻³·h⁻¹, a wartości RE w %.

Tabela 5a. Parametry pracy biofiltru podczas badań
Table 5a. Biofilter operating parameters during the tests

Seria	Pomiar	T [°C]	RH [%]	H ₂ S in	NH ₃ in	LZO in	IL
1	1	26,5	61,7	99,0	36,2	188,2	25,75
1	2	27,6	64,5	88,2	34,7	175,7	23,77
1	3	29,7	66,6	95,5	37,5	177,7	24,74
1	4	24,9	57,9	87,4	36,2	186,2	24,67
1	5	26,8	62,9	92,9	34,5	202,9	26,30
2	1	25,7	57,8	90,8	32,6	196,0	25,43
2	2	29,5	65,2	87,0	33,9	200,3	25,57
2	3	24,2	62,6	97,1	34,4	175,6	24,45
2	4	24,5	58,0	88,3	32,5	196,9	25,29
2	5	24,9	63,8	88,7	37,8	176,5	24,12
3	1	29,6	64,6	91,0	40,0	179,3	24,71
3	2	24,4	66,9	89,8	34,3	196,2	25,50
3	3	24,3	62,0	90,2	37,4	184,2	24,82
3	4	27,2	65,4	89,4	33,4	200,3	25,72
3	5	28,2	66,3	89,6	40,6	199,5	26,25

Tabela 5b. Skuteczność oczyszczania gazów procesowych w biofiltrze
Table 5b. Efficiency of process gas purification in a biofilter

Seria	Pomiar	H ₂ S out	RE H ₂ S	NH ₃ out	RE NH ₃	LZO out	RE LZO	RE śr.	EC
1	1	4,75	95,20	3,12	91,37	15,01	92,02	92,92	23,93
1	2	3,90	95,58	2,64	92,39	15,67	91,08	92,56	22,01
1	3	5,51	94,23	2,98	92,06	15,78	91,12	92,19	22,80
1	4	3,82	95,63	2,88	92,04	14,37	92,28	93,20	22,99
1	5	3,82	95,89	2,53	92,68	15,39	92,42	93,42	24,57
2	1	4,65	94,88	2,38	92,69	16,12	91,77	92,75	23,59
2	2	4,35	95,00	2,39	92,96	16,44	91,79	92,79	23,73
2	3	5,08	94,77	2,43	92,93	13,14	92,52	93,27	22,81
2	4	4,86	94,50	2,56	92,12	15,96	91,89	92,64	23,43
2	5	4,51	94,92	3,24	91,43	14,93	91,54	92,51	22,32
3	1	4,67	94,87	2,91	92,71	13,84	92,28	93,10	23,00
3	2	4,70	94,76	2,89	91,59	17,37	91,15	92,21	23,51
3	3	4,53	94,97	2,65	92,92	14,79	91,97	92,95	23,08
3	4	3,94	95,59	2,84	91,50	17,26	91,38	92,56	23,81
3	5	4,28	95,23	3,31	91,84	17,54	91,21	92,38	24,25

Tabela 6a. Parametry pracy bioskrubera podczas badań
Table 6a. Bioscrubber operating parameters during the tests

Seria	Pomiar	T [°C]	RH [%]	H ₂ S in	NH ₃ in	LZO in	IL
1	1	23,5	70,6	90,1	38,3	180,7	29,15
1	2	24,4	67,6	87,9	34,1	189,8	29,41
1	3	28,8	61,4	87,2	34,4	186,4	29,05
1	4	26,7	60,6	91,7	40,0	202,4	31,53
1	5	24,1	59,4	87,2	40,2	194,0	30,33
2	1	26,2	67,8	91,1	41,0	175,3	29,00
2	2	27,7	67,4	97,3	40,2	183,6	30,30
2	3	25,8	68,5	98,2	37,2	191,7	30,85
2	4	23,8	66,7	99,9	39,9	194,8	31,56
2	5	25,9	69,1	88,1	38,8	173,9	28,57
3	1	27,5	65,0	95,0	40,3	180,7	29,80
3	2	24,5	61,0	98,8	37,9	186,3	30,47
3	3	24,5	64,2	97,5	40,2	199,4	31,80
3	4	24,1	65,0	97,9	39,6	194,3	31,29
3	5	26,0	62,3	89,8	35,7	191,8	29,68

Tabela 6b. Skuteczność oczyszczania gazów procesowych w bioskruberze
Table 6b. Efficiency of process gas purification in a bioscrubber

Seria	Pomiar	H ₂ S out	RE H ₂ S	NH ₃ out	RE NH ₃	LZO out	RE LZO	RE śr.	EC
1	1	1,26	98,60	1,46	96,19	10,87	93,99	95,61	27,85
1	2	1,19	98,65	1,28	96,23	11,46	93,96	95,53	28,09
1	3	2,35	97,30	1,60	95,35	10,93	94,14	95,17	27,65
1	4	1,54	98,32	1,45	96,38	10,99	94,57	95,81	30,20
1	5	1,01	98,84	1,99	95,04	10,34	94,67	95,85	29,06
2	1	1,71	98,13	1,45	96,47	8,41	95,20	96,24	27,91
2	2	1,59	98,36	1,29	96,80	8,92	95,14	96,33	29,16
2	3	2,11	97,85	1,42	96,17	10,32	94,62	95,76	29,54
2	4	2,14	97,86	1,41	96,47	10,60	94,56	95,77	30,23
2	5	1,57	98,22	1,56	95,96	10,68	93,86	95,41	27,06
3	1	2,64	97,22	1,77	95,60	9,47	94,76	95,60	28,49
3	2	1,27	98,72	1,65	95,65	9,81	94,73	96,06	29,28
3	3	2,09	97,85	1,54	96,17	11,90	94,03	95,39	30,34
3	4	1,16	98,82	1,76	95,55	12,17	93,74	95,45	29,88
3	5	1,76	98,04	1,56	95,63	9,44	95,08	95,98	28,73

Tabela 7. Zestawienie statystyczne wyników oczyszczania gazów procesowych
Table 7. Statistical summary of process gas purification results

Technologia	Średnia RE [%]	SD [%]	CV [%]	Min RE [%]	Max RE [%]	Średnie IL [g·m ⁻³ ·h ⁻¹]	Średnie EC [g·m ⁻³ ·h ⁻¹]
Biofiltr	92,76	0,38	0,41	92,19	93,42	25,14	23,32
Bioskruber	95,73	0,33	0,34	95,17	96,33	30,19	28,90

T – temperatura gazu procesowego, RH – wilgotność względna gazu, RE – stopień usunięcia zanieczyszczeń, IL – obciążenie zanieczyszczeniami, EC – zdolność eliminacji.

Dla uzyskanych danych średni stopień usunięcia zanieczyszczeń wynosił około 93% dla biofiltru oraz około 96% dla bioskrubera. Różnica ta wskazuje na wyższą efektywność bioskrubera w warunkach wysokiego obciążenia gazami z procesu kompostowania odpadów organicznych z selektywnej zbiórki. Jednocześnie wyniki biofiltru potwierdzają wysoką stabilność pracy złoża torfowo-kompostowego zaszczepionego osadem czynnym.

Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania wykazały wysoką skuteczność obu analizowanych technologii biologicznego oczyszczania gazów odlotowych powstających podczas kompostowania odpadów organicznych pochodzących z selektywnej zbiórki. Średnia skuteczność usuwania analizowanych zanieczyszczeń wyniosła 92,76% dla biofiltru oraz 95,73% dla bioskrubera, przy czym w obu przypadkach uzyskano stabilną pracę instalacji przez cały okres badań. Uzyskane wyniki należą do wyższych wartości raportowanych w literaturze dla biologicznych metod oczyszczania gazów, gdzie efektywność usuwania siarkowodoru, amoniaku oraz lotnych związków organicznych najczęściej wynosi od 80% do 95%, a w optymalnych warunkach eksploatacyjnych może przekraczać 95% [5-14].

Nieznacznie wyższa skuteczność bioskrubera mogła wynikać przede wszystkim z dwustopniowego charakteru procesu oczyszczania. W pierwszym etapie następowała absorpcja zanieczyszczeń w cieczy roboczej, natomiast w drugim ich biodegradacja przez mikroorganizmy rozwijające się w bioreaktorze. Takie rozwiązanie zwiększa powierzchnię kontaktu fazy gazowej z biologicznie aktywną cieczą oraz poprawia transport masy, szczególnie dla związków dobrze rozpuszczalnych w wodzie, takich jak siarkowodor i amoniak. Podobne zależności opisali Barbusiński i wsp. [5] oraz Rybarczyk i wsp. [7], wskazując na przewagę bioskrubów podczas oczyszczania gazów o wysokiej wilgotności oraz zmiennym składzie.

Biofiltr z wypełnieniem torfowo-kompostowym również wykazał bardzo wysoką skuteczność usuwania wszystkich analizowanych zanieczyszczeń. Zastosowana mieszanina torfu, kompostu oraz zrębków drzewnych charakteryzowała się dużą porowatością, wysoką zdolnością retencji wilgoci oraz odpowiednimi właściwościami sorpcyjnymi. W czasie całego eksperymentu nie obserwowano nadmiernego zagęszczenia materiału filtracyjnego ani istotnego wzrostu spadku ciśnienia, co świadczy o prawidłowym doborze składu złoża. Wyniki te są zgodne z obserwacjami Vikranta i wsp. [1] oraz Sheoran i wsp. [6], którzy wskazują, że mieszaniny kompostowo-torfowe należą do najefektywniejszych materiałów filtracyjnych stosowanych w biofiltracji gazów odorowych.

Wilgotność materiału filtracyjnego stanowiła ważny parametr eksploatacyjny procesu. W badaniach własnych utrzymywano ją na poziomie 45-60%, co zapewniało stabilne warunki rozwoju biofilmu i jednocześnie nie powodowało nadmiernego wzrostu oporów przepływu.

W literaturze podkreśla się, że spadek wilgotności poniżej około 40% prowadzi do ograniczenia aktywności mikroorganizmów oraz zmniejszenia szybkości biodegradacji, natomiast nadmierne uwodnienie może skutkować powstawaniem stref bez-tlenowych i pogorszeniem transportu gazów przez złożę [5, 6]. Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność utrzymywania wilgotności w zakresie zalecanym przez innych autorów.

Warunki temperaturowe miały charakter mezofilowy. Temperaturę złoża biofiltru i cieczy roboczej bioskrubera utrzymywano w zakresie 20-25°C, natomiast temperatura gazu procesowego rejestrowana podczas pomiarów wynosiła 23,5-29,7°C. Zakresy te odpowiadały warunkom sprzyjającym aktywności mikroorganizmów mezofilowych. W całym okresie badań nie obserwowano gwałtownych zmian aktywności biologicznej ani pogorszenia skuteczności oczyszczania, co świadczy o utrzymaniu korzystnych warunków prowadzenia procesu. Wyniki te pozostają zgodne z danymi przedstawionymi przez Sheoran i wsp. [6] oraz Delhomé i Heitz [10], którzy wskazują, że największą aktywność mikroorganizmów uzyskuje się w zakresie temperatur od 20°C do 35°C.

Należy podkreślić, że badania przeprowadzono wyłącznie w okresie letnim, w warunkach mezofilowych opisanych powyżej. Uzyskane wyniki odnoszą się zatem do warunków letnich i nie mogą stanowić podstawy do bezpośredniego projektowania instalacji pracujących całorocznie, szczególnie w okresie zimowym, kiedy obniżenie temperatury może powodować spadek aktywności biologicznej oraz zmniejszenie skuteczności oczyszczania gazów.

Należy również zauważyć, że oznaczanie stężeń pojedynczych związków odorotwórczych, takich jak H_2S , NH_3 czy LZO, nie pozwala na pełną ocenę uciążliwości zapachowej emitowanych gazów. Jak wskazują Sówka [11] oraz Grzelka i wsp. [12], kompleksowa ocena skuteczności instalacji dezodoryzacyjnych powinna obejmować również oznaczanie stężenia zapachowego metodą olfaktometrii dynamicznej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13725. Połączenie metod analitycznych i sensorycznych umożliwia pełniejszą ocenę rzeczywistej skuteczności w ograniczaniu uciążliwości zapachowej instalacji. W niniejszej pracy ocenę efektywności obu technologii oparto na oznaczeniach H_2S , NH_3 oraz LZO, dlatego uzyskane wyniki odnoszą się przede wszystkim do skuteczności usuwania tych zanieczyszczeń, a nie do całkowitej redukcji stężenia zapachowego.

Jednym z najważniejszych parametrów technologicznych był czas retencji gazu

(EBRT). W niniejszych badaniach EBRT wynosił około 45 s dla biofiltru oraz 38,2 s dla bioskrubera. Obie wartości mieściły się w zakładanym zakresie 30-60 s. W literaturze wskazuje się, że dla gazów emitowanych podczas kompostowania optymalny czas retencji mieści się najczęściej w zakresie 30-60 s, natomiast jego dalsze zwiększanie nie powoduje proporcjonalnego wzrostu skuteczności oczyszczania, prowadząc jedynie do zwiększenia objętości instalacji oraz kosztów inwestycyjnych [7, 10, 14]. Zastosowane wartości EBRT mieściły się w zakresie wskazywanym w literaturze.

Na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie osadu czynnego jako inokulum zarówno biofiltru, jak i bioskrubera. W większości opisywanych w literaturze badań mikroflora rozwija się naturalnie w trakcie eksploatacji instalacji lub pochodzi z materiału filtracyjnego. W niniejszych badaniach zastosowanie osadu czynnego zapewniło obecność aktywnej biomasy w obu układach od początku okresu adaptacji, co mogło sprzyjać szybszej stabilizacji procesu. Jednak ze względu na brak wariantu kontrolnego bez inokulacji nie było możliwe ilościowe określenie wpływu inokulacji na skuteczność oczyszczania [5-14].

Analiza wartości obciążenia zanieczyszczeniami (II) oraz zdolności eliminacji (EC) wykazała, że bioskruber osiągał wyższą wydajność usuwania zanieczyszczeń oraz utrzymywał wysoką skuteczność przy obserwowanej zmienności składu gazów procesowych. Biofiltr również pracował stabilnie przez cały okres badań, jednak miał prostszą konfigurację technologiczną, niewymagającą układu recyrkulacji cieczy ani napowietrzania bioreaktora. Oznacza to, że wybór technologii powinien być uzależniony przede wszystkim od rodzaju oczyszczanych gazów, ich składu jakościowego, wielkości instalacji oraz przewidywanych kosztów eksploatacji.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zarówno biofiltr z wypełnieniem torfowo-kompostowym, jak i bioskruber mogą stanowić skuteczne rozwiązania ograniczające emisję badanych zanieczyszczeń gazowych związanych z uciążliwością odorową podczas kompostowania odpadów organicznych. Wysoka efektywność obu technologii, a w przypadku biofiltru także możliwość wykorzystania naturalnych materiałów filtracyjnych, wpisują się w aktualne kierunki rozwoju technologii środowiskowych zgodnych z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego rozwoju.

Ograniczeniami przeprowadzonych badań były laboratoryjno-terenowy charakter doświadczenia, prowadzenie

pomiarów wyłącznie w okresie letnim, ograniczona liczba serii pomiarowych oraz analiza trzech grup zanieczyszczeń (H_2S , NH_3 i LZO). Z tego względu uzyskane wyniki powinny być interpretowane jako odnoszące się do badanych warunków eksploatacyjnych i wymagają dalszej weryfikacji w skali technicznej oraz w całorocznym cyklu pracy instalacji.

Wnioski

1. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką skuteczność obu analizowanych technologii oczyszczania gazów odlotowych z procesu kompostowania odpadów organicznych. Średni stopień usuwania zanieczyszczeń wyniósł 92,76% dla biofiltru oraz 95,73% dla bioskrubera. Bioskruber osiągnął wyższą efektywność, szczególnie w odniesieniu do amoniaku i siarkowodoru, oraz utrzymywał wysoką skuteczność przy obserwowanej zmienności obciążenia i wysokiej wilgotności gazów procesowych.
2. Biofiltr z wypełnieniem torfowo-kompostowym pracował stabilnie w badanym okresie przy utrzymaniu wilgotności złoża na poziomie 45-60%. Charakteryzował się prostszą konfiguracją technologiczną i nie wymagał układu recyrkulacji cieczy ani napowietrzania bioreaktora.
3. Uzyskane wyniki należy interpretować w kontekście warunków eksploatacyjnych, w szczególności temperatury, wilgotności, czasu retencji gazu i obciążenia zanieczyszczeniami. Inokulacja osadem czynnym mogła sprzyjać skróceniu okresu adaptacji biomasy i stabilizacji procesu, jednak ze względu na brak wariantu kontrolnego bez inokulacji ilościowe określenie jej wpływu na skuteczność oczyszczania nie jest możliwe.
4. Analiza wskaźników RE, IL i EC wykazała, że bioskruber osiągał wyższą efektywność oczyszczania i utrzymywał wysoką skuteczność przy obserwowanej zmienności składu gazów procesowych, natomiast biofiltr zapewniał stabilną pracę przy prostszej konstrukcji i mniejszych wymaganiach eksploatacyjnych.

Dobór technologii powinien uwzględniać skład gazów, wilgotność, zmienność obciążenia, skalę instalacji oraz koszty eksploatacyjne.

5. Uzyskane wyniki odnoszą się do badań prowadzonych w skali laboratoryjno-terenowej w okresie letnim; temperaturę złoża biofiltru i cieczy roboczej bioskrubera utrzymywano w zakresie 20-25°C, a temperatura gazu procesowego podczas pomiarów wynosiła 23,5-29,7°C. Z tego względu nie powinny być bezpośrednio przenoszone na całoroczne instalacje pełnoskalowe bez dalszej weryfikacji obejmującej dłuższy okres obserwacji, warunki zimowe oraz pracę w skali technicznej.
6. Obie technologie mogą być skutecznie stosowane do ograniczania emisji zanieczyszczeń gazowych i substancji odorowych z instalacji kompostowania. Wyniki mogą stanowić podstawę do dalszej optymalizacji systemów dezodoryzacji, w tym doboru materiałów filtracyjnych, sposobu inokulacji oraz parametrów eksploatacyjnych, jednak ich wykorzystanie w projektowaniu powinno uwzględniać ograniczenia przeprowadzonych badań.

Literatura

- [1] Vikrant K., Kim K.-H., Szulejko J.E., Pandey S.K., Singh R.S., Giri B.S., Brown R.J.C., Lee S.H. Bio-filters for the Treatment of VOCs and Odors – A Review. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2017;11(3):139–152. <https://doi.org/10.5572/ajae.2017.11.3.139>
- [2] Lelicińska-Serafin K., Rolewicz-Kalińska A., Manczarski P. VOC Removal Performance of a Joint Process Coupling Biofiltration and Adsorption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(17):3009. <https://doi.org/10.3390/ijerph16173009>
- [3] Gospodarek M., Rybaczek P., Szulczyński B., Gębicki J. Comparative Evaluation of Selected Biological Methods for the Removal of Hydrophilic and Hydrophobic Odorous VOCs from Air. *Processes*. 2019;7(4):187. <https://doi.org/10.3390/pr7040187>
- [4] Rolewicz-Kalińska 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*. 2021;165:69–80. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.10.017>
- [5] Barbusiński K., Parzenta-Gabor A., Kasperczyk D., Urbaniec K., Kozik V. Removal of Odors (Mainly H_2S and NH_3) Using Biological Treatment Methods. *Clean Technologies*. 2021;3(1):138–155. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010009>
- [6] Sheoran K., Kaur H., Siwal S.S., Saini A.K., Vo D.-V.N., Thakur V.K. Air Pollutants Removal Using Biofiltration Technique: A Challenge at the Frontiers of Sustainable Environment. *ACS Engineering Au*. 2022;2(5):378–396. <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.2c00020>
- [7] Rybaczek P., Szulczyński B., Gębicki J., Hupka J. Removal of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Air: Focus on Biotrickling Filtration and Process Modeling. *Processes*. 2022;10(12):2531. <https://doi.org/10.3390/pr10122531>
- [8] Çelikten H., Kuzu S.L., Saral A., Aksel M. Performance Evaluation of a Full-Scale Open Bed Biofilter through On-Site Measurements and CFD Analyses. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;152:692–700. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.047>
- [9] Gałwa-Widera M. Comparison of the Efficiency of Biofiltration on a Compost Filter and a Scrubber with Hydrogen Peroxide in Removing Odors from a Composting Plant. *Journal of Ecological Engineering*. 2025;26(12):400–408. <https://doi.org/10.12911/22998993/208939>
- [10] Delhoméne M.C., Heitz M. Biofiltration of Air: A Review. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2005;25(1–2):53–72. <https://doi.org/10.1080/07388550590935814>
- [11] Sówka I. Metody identyfikacji odorotwórczych gazów emitowanych z obiektów przemysłowych. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Monografie. Nr 55. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2011.
- [12] Grzelka A., Sówka I., Miller U. Metody oceny emisji odorów z obiektów gospodarki hodowlanej. *Inżynieria Ekologiczna*. 2018;19(2):56–64. <https://doi.org/10.12912/23920629/86054>
- [13] Devinny J.S., Deshusses M.A., Webster T.S. Biofiltration for Air Pollution Control. CRC Press, Boca Raton, 1999. <https://doi.org/10.1201/9781315138275>
- [14] Mudliar S., Giri B., Padoley K., Satpute D., Dixit R., Bhatt P., Pandey R., Juwarkar A., Vaidya A. Bio-reactors for Treatment of VOCs and Odours – A Review. *Journal of Environmental Management*. 2010;91(5):1039–1054. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.006>
- [15] Nzila A., Razzak A.R., Zhu J. Bioaugmentation: An Emerging Strategy of Industrial Wastewater Treatment for Reuse and Discharge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016;13(9):846. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090846>
- [16] Muter, O. (2023). Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation: A critical review of advances and knowledge gaps. *Microorganisms*, 11(3), 710. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>



Druk zamówienia prenumeraty
czasopisma INSTAL
na stronie journals.pcz.pl/instal/pl/orders