



## Biotechnologiczne metody usuwania zanieczyszczeń z gazów odlotowych

Maria Łebkowska, Agnieszka Tabernacka

Instytut Systemów Inżynierii Środowiska  
Politechnika Warszawska  
Warszawa

### Biological treatment of contaminated waste gases

#### Summary

This paper presents the biological gas treatment technologies – biofiltration, bioscrubbing, trickling biofiltration and membrane bioreactors. Carrier materials, moisture content, pH values, pressure drop, chemical compounds' concentration and structure as well as inocula are considered. Several case studies presented in the literature are reviewed. The advantages of biofiltration over physical and chemical treatment of mixed waste gases include low capital and operating costs, acceptance as an environmentally friendly process and the absence of secondary pollutants.

#### Key words:

bioreactor design, biofiltration, trickling filter, bioscrubber, membrane bioreactor, waste gas biotreatment.

#### Adres do korespondencji

Maria Łebkowska,  
Instytut Systemów  
Inżynierii Środowiska,  
Politechnika Warszawska,  
ul. Nowowiejska 20,  
00-653 Warszawa.

### 1. Wstęp

W ostatnich dziesięcioleciach nastąpił rozwój metod biotechnologicznych stosowanych do usuwania zanieczyszczeń gazowych z gazów odlotowych. Mikrobiologiczne sposoby oczyszczania gazów okazały się skuteczne, wydajne i mniej kosztowne od metod fizyczno-chemicznych, jak m. in. adsorpcji, wymywania, kondensacji i utleniania.

## 2. Charakterystyka urządzeń do usuwania zanieczyszczeń gazowych

Do eliminacji zanieczyszczeń gazowych na drodze biodegradacji stosowane są bioskrubery, zraszane biofiltry, biofiltry i bioreaktory membranowe. Zróżnicowanie tych urządzeń wynika z rodzaju faz ruchomych, nośników oraz sposobu umiejscowienia aktywnej biomasy w reaktorach (tab. 1).

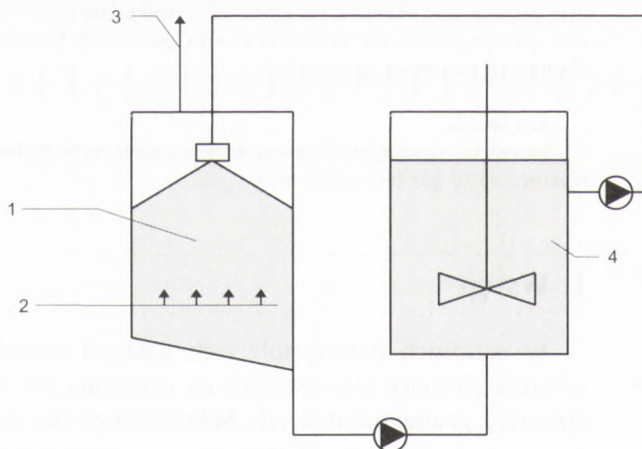
Tabela 1

Zestawienie podstawowych parametrów technicznych urządzeń do biologicznego oczyszczania zanieczyszczeń gazowych (1, uzupełnione)

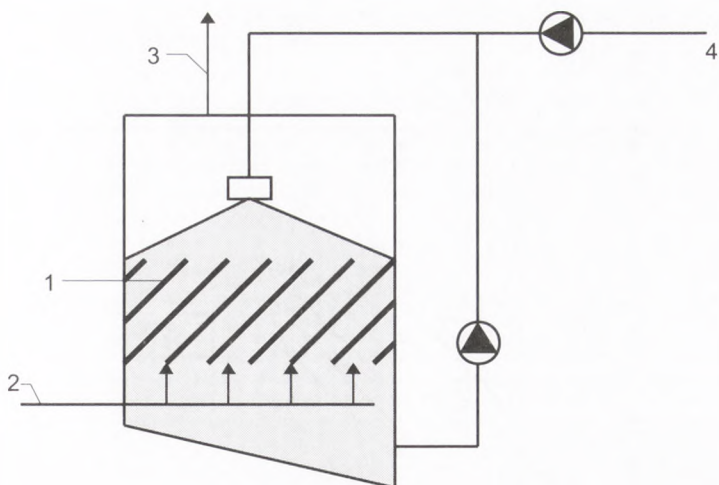
Typ bioreaktora	Fazy ruchome	Nośnik	Biomasa
bioskruber	ciecz i gaz	brak	rozproszona
biofiltr zraszany	ciecz i gaz	syntetyczny	unieruchomiona
biofiltr	gaz	organiczny/syntetyczny	unieruchomiona
bioreaktor membranowy	gaz	syntetyczny	unieruchomiona/rozproszona

### 2.1. Bioskruber

Bioskruber (rys. 1) składa się z kolumny, w której zanieczyszczenia gazowe absorbowane są przez ciecz odprowadzoną następnie do bioreaktora. W bioreaktorze zachodzi mikrobiologiczny rozkład związków organicznych zawartych w fazie ciekłej. Urządzenie stosowane jest do eliminacji związków organicznych, dla których współczynnik podziału powietrze/woda jest niższy od 0,01.



Rys. 1. Bioskruber (wg Kennes, Thalasso (1)); 1 – kolumna wymiany gaz/ciecz, 2 – gaz zanieczyszczony, 3 – gaz oczyszczony, 4 – bioreaktor.



Rys. 2. Biofiltr zraszany (wg Kennes, Thalasso (1)); 1 – nośnik, 2 – gaz zanieczyszczony, 3 – gaz oczyszczony, 4 – woda/roztwór.

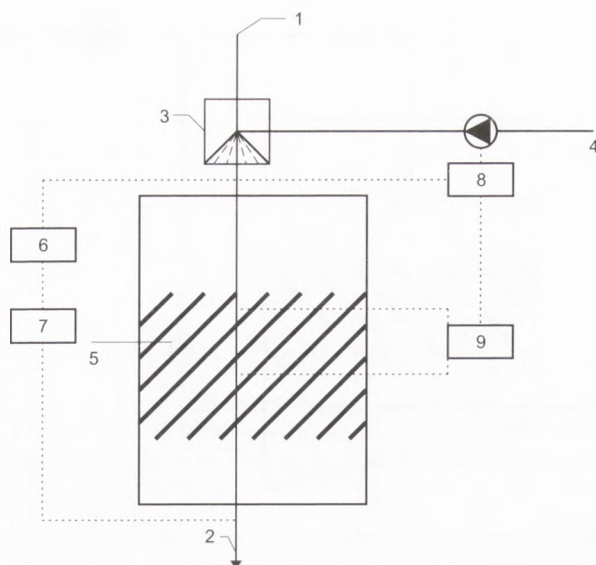
## 2.2. Biofiltr zraszany

Biofiltr zraszany (rys. 2) to filtr wypełniony nośnikiem syntetycznym, ceramicznym lub aktywnym węglem. Gaz zanieczyszczony wprowadzany jest od dołu urządzenia, a recykulowana woda – zrasza wypełnienie od góry. Mikroorganizmy są immobilizowane na nośniku. Metoda nadaje się do oczyszczania gazów ze związków o współczynniku podziału powietrze – woda niższym od 0,1.

W obu wymienionych urządzeniach najważniejszym parametrem procesu jest szybkość przechodzenia zanieczyszczeń z gazu do fazy wodnej. Ponadto w przypadku biofiltru zraszane istotne jest zasilanie błony biologicznej wodą, gwarantujące właściwą powierzchnię zwilżania, przy czym szybkość przepływu wody wpływa na efektywność eliminacji zanieczyszczeń przez drobnoustroje. Wzrost szybkości przepływu wody przez filtr powoduje obniżenie wydajności biodegradacji. Innym problemem jest możliwość nadmiernego rozwoju błony biologicznej prowadzącego do „zatkania” i spadku ciśnienia w filtrze. W celu przeciwdziałania tym niekorzystnym zjawiskom należy eksperymentalnie dobierać parametry techniczne gwarantujące kontrolowany przyrost biomasy, sposób i częstotliwość płukania biofiltru utrzymujące odpowiednie ciśnienie w filtrze.

## 2.3. Biofiltr

Biofiltr (rys. 3) jest najczęściej stosowanym urządzeniem do eliminacji zanieczyszczeń gazowych z gazów odlotowych z uwagi na łatwość eksploatacji, stosun-

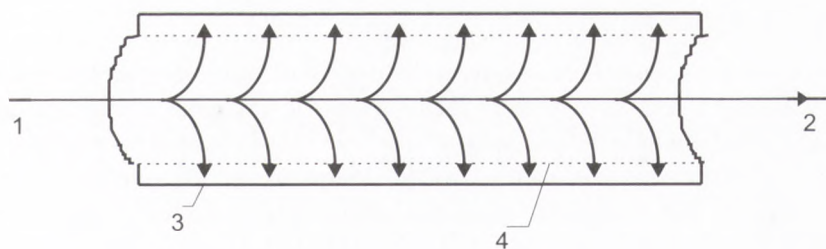


Rys. 3. Biofiltr – schemat i parametry kontrolne (wg Kennes, Thalasso (1)) 1 – gaz zanieczyszczony, 2 – gaz oczyszczony, 3 – nawilżacz gazu, 4 – woda, 5 – nośnik, parametry kontrolne: 6 – szybkość degradacji, 7 – spadek ciśnienia, 8 – wilgotność gazu, 9 – wilgotność nośnika.

kowo niskie koszty i wysoką sprawność. Gaz podawany jest od dołu warstwy filtrującej, którą stanowią nośniki naturalne jak kompost, torf, osady ściekowe lub mieszane z syntetycznymi m.in. z perlitem, pianką poliuretanową, polistyrenem. W biofiltrze nie występuje ruchoma faza ciekła; wykorzystywany jest do oczyszczania gazów zawierających składniki o współczynniku podziału powietrze/woda niższym od 1. Istotnym problemem jest utrzymanie odpowiedniej wilgotności w warstwie stałej filtru, odpowiedzialnej za aktywność metaboliczną drobnoustrojów. W odróżnieniu od biofiltru zraszane go i od bioskrubera, do których wprowadza się potrzebne sole azotu, fosforu i inne nutrieny, w biofiltrze wypełnienie materiałem naturalnym zapewnia mikroorganizmom źródła makro- i mikroelementów.

## 2.4. Bioreaktor membranowy

Bioreaktor membranowy (rys. 4) stosować można do usuwania hydrofobowych związków organicznych o współczynniku podziału powietrze/woda wyższym od 1. Zanieczyszczony gaz przechodzi przez drobnoporową hydrofobową błonę, w której następuje rozpuszczenie składników hydrofobowych i ich dyfuzja na drugą stronę membrany. Ta strona błony porośnięta jest mikroorganizmami, które rozpoczynają



Rys. 4. Bioreaktor membranowy (wg Ergas i wsp. (3)); 1 – gaz zanieczyszczony, 2 – gaz oczyszczony, 3 – błona biologiczna, 4 – membrana przepuszczalna.

proces biodegradacji. Drobnoustroje mogą być rozproszone lub unieruchomione na membranie (2-4).

### 3. Czynniki wpływające na proces biodegradacji

Wśród czynników wpływających na proces biodegradacji zanieczyszczeń gazowych w biofiltrach wyróżnić można m.in.

- budowę chemiczną i właściwości związków,
- zawartość wody oraz makro- i mikroelementów,
- rodzaj wypełnienia filtru (nośniki),
- temperaturę i odczyn pH,
- mikroorganizmy biorące udział w biochemicznym rozkładzie związków chemicznych, stanowiących zanieczyszczenia w gazie.

Najczęściej w gazach odlotowych występują związki lotne, w tym węglowodory (metan, etan, propan, heksan, benzen, toluen, ksyleny i ich chlorowcopochodne, styren), alkohole, aldehydy i ketony (butanol, propanol, etanol, fenol, aceton, metyloetyloketon, aldehyd propionowy), estry (octan etylu, octan metylu) i inne związki, jak siarczki karbonylu, siarczki dimetylu, siarkowodór, trietyloamina, tlenek węgla i poliglikole. **Biodegradacja zależy od stężenia związków chemicznych** w gazach, ponieważ od koncentracji zależy ich toksyczność względem drobnoustrojów, a także od **obecności podstawników**, które zwiększają lub obniżają szkodliwość substancji. Ogólnie wiadomo, że związki prostołańcuchowe  $C_8-C_{18}$  łatwiej ulegają rozkładowi, aniżeli krótkołańcuchowe lub rozgałęzione; aromatyczne są trudniej biodegradowane aniżeli alifatyczne. Alkohole, aldehydy, kwasy organiczne, estry łatwo ulegają rozkładowi. Podstawnikami, które zwiększają toksyczność związków chemicznych są chlor i inne halogeny, grupy – nitrowa, aminowa, cyjanowa, metylowa oraz hydroksylowa w związkach aromatycznych.

Ważnym ograniczeniem biodegradacji jest niewielka **rozpuszczalność zanieczyszczeń organicznych z gazów w fazie wodnej**. Zależność pomiędzy lotnością

a rozpuszczalnością substancji opisuje prawo Henry'ego. Substancje posiadające wystarczająco niski współczynnik Henry'ego  $< 5-10$  mogą ulegać biodegradacji, a dla związków o wyższych wartościach tego współczynnika należy przewidzieć zwiększenie pojemności operacyjnej filtrów i wzrost kosztów oczyszczania. Niekiedy, przy zastosowaniu bioskruberów do układu wprowadza się wysoko wrzące oleje silikonowe, aby zwiększyć absorpcję zanieczyszczeń słabo rozpuszczalnych w wodzie (2).

Zwykle, **ładunki gazu** doprowadzane do biofiltrów zawierają się w granicach od 50 do 300  $\text{m}^3/\text{m}^3$  reaktora/h, a czas zatrzymania gazu w urządzeniu jest w zakresie 10-70 s (1). Stężenia poszczególnych zanieczyszczeń kształtują się od kilku mg do kilku g w  $\text{m}^3$  gazu. Ottengraf (za (1)), podał, że w konwencjonalnym biofiltrze kompostowym uzyskać można eliminację węgla organicznego 6-16  $\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$  (dla związków trudno rozkładalnych) i 100-200  $\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$  (dla łatwo rozkładalnych).

Biorąc pod uwagę, że w gazach występuje mieszanina związków chemicznych należy się liczyć z tym, że efektywność ich usuwania nie będzie zachodziła ze zbliżoną wydajnością. Na przykład eliminacja acetonu, 2-propanolu i dichlorometanu w biofiltrze wynosiła odpowiednio 164,57 i 15 g substratu/ $\text{m}^3/\text{h}$ , a etanolu i toluenu odpowiednio 120 i 70 g substratu/ $\text{m}^3/\text{h}$  (1).

**Woda** jest niezbędna do procesów fizjologicznych mikroorganizmów i ich aktywności biochemicznej. Przyjmuje się, że wilgotność filtrów kompostowych powinna wynosić 35%, a torfowych – 40%; w przypadku wypełnienia biofiltru glebą optymalna wilgotność jest w granicach 10-20%. Według danych literaturowych (1,2) zakres wilgotności dla biofiltrów kompostowych przyjmowanych przez różnych autorów kształtuje się od 20 do 70%, a dla torfowych od 30 do 70%. Istotne jest także, aby woda podawana do filtru bezpośrednio lub pośrednio przez nawilżanie gazu występowała w postaci drobnych kropli o średnicy poniżej 40  $\mu\text{m}$ , co zwiększa powierzchnię wymiany gaz-ciecz.

Jeśli zanieczyszczenia w gazie nie zawierają niezbędnych, poza węglem, makroelementów i mikroelementów wodę należy wzbogacać solami mineralnymi w stężeniach dobranych na drodze eksperymentalnej.

**Materiały wypełniające** biofiltry powinny zapewniać odpowiednio dużą powierzchnię do zasiedlania przez mikroorganizmy, jakkolwiek także istotna jest ich gęstość, niewielka z przestrzeniami wolnymi zabezpieczającymi przed nadmiarem wzrostu błony i spadkiem ciśnienia w filtrze. W tabeli 2 podano przykładowe rodzaje wypełnień stosowanych w biofiltrach, a w tabeli 3 charakterystykę niektórych nośników.

Tabela 2

Przykłady materiałów stosowanych jako wypełnienie biofiltrów do oczyszczania gazów (1)

Nośnik	Stosunek objętościowy
kompost <sup>a</sup>	1
kompost <sup>a</sup> – wiórki drzewne <sup>b</sup>	–
kompost <sup>a</sup> – perlit	1:1
kompost <sup>a</sup> – ziemia okrzemkowa	–
kompost <sup>a</sup> – polistyren	1:1
torf	1
torf – pianka poliuretanowa	7:3
torf – pianka poliuretanowa – perlit	2:3:5
torf – perlit	2:3
kulki torfowe	1
torf – kompost	1:1
torf – kulki szklane	2:1
kora drzewna <sup>c</sup>	1
gleba	1
gleba – piasek – torf – kompost	20:2:3:3

<sup>a</sup> z kompostowania odpadów stałych; <sup>b</sup> z drzew liściastych; <sup>c</sup> z drzew liściastych.

Tabela 3

Charakterystyka materiałów stosowanych jako wypełnienie biofiltrów (1)

Nośnik	Ciężar objętościowy (gęstość średnia)	Powierzchnia właściwa	Porowatość pustej frakcji	Skład C/N
kompost <sup>a</sup>	0,27 <sup>c</sup>	$380 \times 10^3 \text{m}^{-1\text{e}}$	–	15,2
kompost <sup>a</sup>	0,18-0,30 <sup>c</sup>	–	80-90% <sup>g</sup>	10-18
torf	0,17 <sup>c</sup>	$270 \times 10^3 \text{m}^{-1\text{f}}$	50% <sup>h</sup> 80% <sup>g</sup>	–
torf	0,11 <sup>c</sup> -0,30 <sup>d</sup>	–	–	–
torf	0,11 <sup>c</sup>	–	–	11,5
wióry drzewne <sup>b</sup>	0,096 <sup>c</sup>	$28 \times 10^3 \text{m}^{-1\text{e}}$	–	119

<sup>a</sup> z kompostowania odpadów stałych; <sup>b</sup> z drzew liściastych; <sup>c</sup> sucha próbka; <sup>d</sup> wilgotność 60%; <sup>e</sup> pomiar przez adsorpcję N<sub>2</sub>; <sup>f</sup> obliczona; <sup>g</sup> porowatość; <sup>h</sup> frakcja pusta.

Z danych literaturowych wynika, że powierzchnia właściwa dla tworzenia biofilmu wynosi 40-85 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> kompostu (1).

W reaktorach membranowych stosowane są błony silikonowe, polietylenowe i polistyrenowe. Reij i wsp. (4) przeprowadzili badania nad usuwaniem propenu

w reaktorze z membraną polipropylenową o porowatości 70-75%, średnicy porów 0,1  $\mu\text{m}$  i grubości 75-110  $\mu\text{m}$ . Współczynnik podziału powietrze/woda dla propenu wynosi  $10 \pm 0,5$  przy 30°C, stąd też wybrano ten związek jako modelowy przykład zanieczyszczenia o charakterze hydrofobowym. Szybkość dopływu propenu (w stężeniu  $9,3 \times 10^{-2}$  mola/ $\text{m}^3$ ) do błony biologicznej utworzonej przez zużywające ten związek bakterie *Xanthobacter Py2* wynosił  $1 \times 10^{-6}$  mola/ $\text{m}^2\text{s}$ . Autorzy uzyskali biomasę drobnoustrojów sięgającą ok. 11 kg/ $\text{m}^3$ .

**Temperatura** wpływa na kinetykę procesu biodegradacji zanieczyszczeń gazowych zgodnie ze znanymi ogólnie zasadami. Należy liczyć się z możliwością wzrostu temperatury gazu oczyszczanego podczas rozkładu składników wysokoenergetycznych w znaczących stężeniach, jak np. węglowodorów, a tym samym z suszeniem materiału wypełniającego filtr. W takich przypadkach do utrzymania aktywności drobnoustrojów niezbędne jest wprowadzanie do biofiltru odpowiedniej ilości wody.

**Odczyn pH** powinien być w granicach obojętnego; jeśli jednak w wyniku procesów mikrobiologicznych powstają produkty o charakterze kwasów należy do biofiltru wprowadzać wapienie, ziemię okrzemkową, substancje zasadowe. Przemiany biochemiczne składników chlorowcowych mogą prowadzić do tworzenia soli (NaCl), a utlenianie amoniaku do nagromadzenia azotynów i azotanów. Zjawiska te są niekorzystne i wymagają zabiegów usuwania z filtru produktów reakcji.

#### 4. Mikroorganizmy biorące udział w procesach biodegradacji

Wiele mikroorganizmów zdolnych jest do biodegradacji substancji organicznych w gazach odlotowych lub do utlenienia zredukowanych związków siarki, azotu, węgla. Wśród drobnoustrojów zasiedlających urządzenia do biologicznego oczyszczania gazów występują bakterie z rodzaju: *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Corynebacterium*, *Hyphomicrobium*, *Rhodococcus*, *Xanthobacter*, *Arthrobacter*, *Methylosinus*, *Methylomonas*, *Thiobacillus* oraz grzyby (drożdże i pleśnie). Stwierdzono, że niektóre związki, jak cykloheksan są rozkładane na drodze kometabolizmu. W wielu przypadkach biodegradacja substancji refrakcyjnych poprzedzona jest procesem adaptacji drobnoustrojów do ich rozkładu, który może trwać nawet kilka tygodni.

Peixoto i Mota (5) wykazali zdolność *Pseudomonas putida* ATCC 17484 do biodegradacji toluenu w stężeniu 400 ppm po uprzedniej adaptacji do rozkładu fenolu w koncentracji 600 mg/ $\text{dm}^3$ . Wymienieni autorzy wykazali zdolność usuwania toluenu od początkowego stężenia związku i szybkości przepływu gazu; efektywność biodegradacji obniżała się wraz ze wzrostem początkowej koncentracji wynoszącej od 40 do 5000 ppm, jak również ze wzrostem szybkości przepływu gazu od około 3  $\text{dm}^3/\text{min}$  do około 12  $\text{dm}^3/\text{min}$ . W zastosowanym biofiltrze zraszonym uzyskano 94% usunięcie toluenu w stężeniu 400 ppm, przy czasie kontaktu około minuty i przepływie gazu około 5  $\text{dm}^3/\text{min}$ . Kim i wsp. (6) badali usuwanie w biofiltrze z węglem aktywnym – trichloroetyleny i tetrachloroetyleny przez drobnoustroje adap-



owane do rozwoju fenolu. Stwierdzono, że związki eliminowane były w 100% przy czasie kontaktu 7 minut i początkowym stężeniu około 80 ppm, przy szybkości przepływu gazu – 120 cm<sup>3</sup>/min. Dodatek SPC w stężeniu od 5 do 15 mg/dm<sup>3</sup> wspomagał proces degradacji wymienionych związków.

Kleinheinz i Bagley (7) określili efektywność procesu biofiltracji gazu zawierającego lotne zanieczyszczenia organiczne, głównie węglowodory w stężeniu 320 ppm; eliminacja tych składników zachodziła w 56%, przy czym indywidualnych związków w zakresie 49-90%. Biomasa stanowiły m.in. bakterie *Pseudomonas fluorescens* i *Alcaligenes xylosoxidans*. Autorzy ponadto wykazali znaczny spadek toksyczności i mutagenności gazu po procesie biofiltracji.

Okkerse i in. (8) zajmowali się badaniami nad gromadzeniem się biomasy w biofiltrach zraszanych i możliwością ich „zatykania” nadmiarem błony. Doświadczenia prowadzono w urządzeniu modelowym stosując dichlorometan jako zanieczyszczenie gazu. Zaproponowano wzór matematyczny opisujący akumulację biomasy w systemie kolumnowego biofiltru uwzględniający gęstość błony (kg/m<sup>3</sup>), pojemność kolumny (m<sup>3</sup>), porowatość wypełnienia pustego i przy krytycznym spadku ciśnienia, a także masę kolumny w warunkach nośnika suchego i mokrego oraz recyrkulacji wody. Laurenz i wsp. (9) badali oczyszczanie gazu zawierającego toluen w reaktorze z mieszaniem i z okresowym usuwaniem biomasy. Jako wielkości optymalne biomasy w reaktorze uznano 5-30 kg sm/m<sup>3</sup> złoza.

Berthe-Corti i wsp. (10) badali oczyszczanie gazów z lotnych składników organicznych w systemie bioreaktorów z zamkniętym obiegiem gazu. Zastosowano trzy różne typy reaktorów, w tym jeden fotoreaktor zawierający hodowlę glonów asymilujących CO<sub>2</sub> (wytworzony w biofiltrze zraszonym) i produkujących tlen. W tych warunkach efektywność eliminacji BTX (benzen, toluen, ksyleny) osiągała 41-93%, a lotnych chlorowcopochodnych węglowodorów 29-53%.

## 5. Podsumowanie

W cytowanych pracach zawarte są przykłady kierunków badań laboratoryjnych nad oczyszczaniem biologicznym gazów. Równolegle liczba urządzeń pracujących w warunkach przemysłowych stale rośnie, tym bardziej, że biofiltracja jest znacznie tańszą metodą eliminacji zanieczyszczeń z gazów, aniżeli sposoby fizyczno-chemiczne, np. w USA koszt biologicznego oczyszczania 1000 m<sup>3</sup> gazu wynosi ok. 1,5 USD, gdy tymczasem koszt procesów fizyczno-chemicznych mieści się w zakresie 3-10 USD.

Wytyczne do projektowania biofiltrów i bioskruberów według „Vereinigung Deutscher Ingenieure VDJ Nr 3477 i 3478” podano w tabeli 4 (2).

Dane operacyjne biofiltrów i bioskruberów [VDJ Nr 3477 i 3478]

Biofiltr		Bioskruber	
obciążenie powierzchni	50-300 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	szybkość przepływu gazu	1 m/s
czas zatrzymania	50-90 s	czas zatrzymania	3-4 s
porowatość nośnika	> 80%	stosunek ciecz/gaz	2-5 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
sucha masa organiczna	> 55%	biomasa w komorze napowietrzania	3-8 kg/m <sup>3</sup>
odczyn nośnika pH	7-8	pH fazy wodnej	5-8
stężenie zanieczyszczeń	< 1 g C <sub>org</sub> /m <sup>3</sup>	stężenie zanieczyszczeń	< 0,5 g C <sub>org</sub> /m <sup>3</sup>
ładunek objętościowy	< 50 000 m <sup>3</sup> /h	ładunek objętościowy	< 100 000 m <sup>3</sup> /h
wydajność biodegradacji	90-99%	wydajność degradacji	90-99%

W artykule tym nie zawarto wszystkich zagadnień związanych z biologicznymi procesami eliminacji zanieczyszczeń gazowych z gazów odlotowych, przybliżono jednak problematykę biotechnologii oczyszczania gazów. W Polsce badania w tym zakresie zapoczątkowano w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej (11,12), a także zaprojektowano i wykonano kilka instalacji przemysłowych do usuwania zanieczyszczeń gazowych. Podkreślić jednak należy, że możliwości zastosowania tej metody są jeszcze nie w pełni wykorzystane.

## Literatura

1. Kennes Ch., Thalasso F., (1998), J. Chem. Technol. Biotechnol., 72, 303- 319.
2. Holubar P., Braun R., (1995), Hed. Fac. Landbonuw. Univ. Gent., 60/4b, 2303-2312.
3. Ergas S. J., Shumway L., Fitch M. W., Neemann J. J., (1999), Biotechnology & Bioengineering, 63, 4, 431-441.
4. Reij M. W., de Gooijer K. D., de Bont J. A. M., Hartman S., (1995), Biotechnology & Bioengineering, 45, 2, 107-115.
5. Peixoto J., Mota M., (1998), Bioprocess Engineering, 19, 393-397.
6. Kim J. O., Terkonda P. K., Lee S. D., (1998), Bioprocess Engineering, 19, 253-259.
7. Kleinheinz G. T., Bagley S. T., (1998), Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 20, 101-108.
8. Okkerse W. J., Ottengraf S. P. P., Osinga-Kulpers B., Okkerse H., (1999), Biotechnology & Bioengineering, 63, 4, 418-430.
9. Laurenzis A., Heits H., Wübker S. M., Heinze U., Friedman C., Werner U., (1998), Biotechnology & Bioengineering, 57, 4, 497-503.
10. Berthe-Corti L., Conradi B., Hulsch R., Sinn B., Wiesehan K., (1998), Acta Biotechnol., 18, 291-304.
11. Rutkowski J. D., Szklarczyk M., Czyszczoń Z., Gaj K., Kędzierski L., Świątlik J. Sposób oczyszczania gazów odlotowych z zanieczyszczeń organicznych podatnych na biodegradację. Patent nr 153092 z 4.11.1991.
12. Szklarczyk M., Czermarmazowicz M., Adamiak W., (1997), Biotechnologia, 1, (36), 108-116.