

Hydraulika i biofiltracja trietyloaminy na złożu modyfikowanym EKOSORB – 100

*Klaudia Chmiel
Politechnika Śląska, Gliwice*

*Michał Palica
Politechnika Śląska, Gliwice,
Ośrodek Badawczo – Rozwojowy „BAROWENT”, Katowice*

*Jerzy Waluś
Ośrodek Badawczo – Rozwojowy „BAROWENT”, Katowice*

*Recenzent: Anna M. Anielak
Politechnika Koszalińska*

1. Cel i zakres badań

W artykule przedstawiono wyniki badań oporów przepływu powietrza przez modyfikowane złożo supersorbentowe EKOSORB – 100 o różnym stopniu wstępnego nawilżenia oraz opis kinetyki biodegradacji trietyloaminy w postaci zależności szybkości biofiltracji i skuteczności procesu w funkcji obciążenia złoża. W opisie hydrauliki oparto się o pojęcie przepuszczalności złoża, zależność Leva'y i propozycję Windspergera ujmującą wspólnie współczynnik oporów przepływu i krętość porów. Na podstawie ostatniego ujęcia oszacowano zakres zmienności Re , średnicę ekwiwalentną i powierzchnię rozwiniętą EKOSORBU-100 w zależności od stopnia jego wstępnego nawilżenia. Porowatość złoża wyznaczano tzw. metodą próżniową w niezależnych badaniach. Wyniki badań hydrauliki porównano z rezultatami dla innych złożów opisanych w literaturze. Badania prowadzono w zakresie liniowej prędkości przepływu gazu liczonej na pusty przekrój kolumny $w = 0,04 \div 0,081$ m/s, a więc w zakresie stosowanym w praktyce przemysłowej dla biofiltrów.

2. Charakterystyka modyfikowanego złoża polimerowego EKOSORB-100

Złoże handlowe o nazwie EKOSORB-100 należy do grupy supersorbentów polimerowych charakteryzujących się dużą chłonnością wilgoci, które utrzymują tzw. wodę stałą. Wg informacji producenta, złoża takie stosuje się przede wszystkim w intensywnej produkcji roślinnej, w uprawie przyjaznej środowisku oraz w rekultywacji gleb. Supersorbenty użyte jako dodatek do podłoża naturalnych zwiększają radykalnie pojemność wodną gleby, a wynika to z faktu, że woda lejna, zwłaszcza dla gleb przepuszczalnych (piaszczystych), zmienia się w wodę zestaloną, która oddawana jest w miarę zapotrzebowania stopniowo do korzeni roślin. Szacuje się, że około 90% wody zatrzymanej przez supersorbent może być przekazana roślinom. Oddawanie wody roślinom powoduje kurczenie się złoża, dodawanie – ponowne jego pęcznienie, przy czym cykl można powtarzać dowolnie. Użycie EKOSORB-100 zmniejsza częstotliwość podlewania i poprawia warunki wodne gleb. Wraz z podłożem do mieszanin handlowych zawierających supersorbenty polimerowe wprowadza się również składniki nawozowe, m.in. azot, potas i sód. Stąd EKOSORB-100 chętnie stosuje się do otoczkowania nasion, do uzdatniania i zwiększania efektywności nawozów odpadowych (w tym osadów ściekowych, szlamów, itp.) oraz do rekultywacji terenów zdegradowanych przez przemysł. Ekosorbry są substancjami nietoksycznymi i po około 5 latach ulegają biodegradacji, przy czym produkty takiej biodegradacji nie stanowią zagrożenia dla środowiska naturalnego.

Niekiedy supersorbenty, zawierające zestaloną wodę, wykorzystuje się do zagęszczania i zestalania (np. kosmetyków, wyrobów chemii gospodarczej, półpłynnych mas gruntu czy odpadów przemysłowych). Można je użyć do osuszania cieczy organicznych, osuszania gruntów i fundamentów budowlanych, wznoszenia tam awaryjnych w górnictwie, czy jako środek gaśniczy zabezpieczający hałdy węglowe przed samozapaleniem. Stabilność EKOSORB-100 jest praktycznie nieograniczona pod warunkiem przechowywania go w opakowaniach zabezpieczonych przed dostępem wilgoci. Zdolność wchłaniania wody zależy natomiast w istotny sposób od stopnia jej zasolenia – najwyższą uzyskuje się dla wody zdemineralizowanej. Ze wzrostem stężenia elektrolitów zdolność ta gwałtownie maleje.

Supersorbenty polimerowe zbudowane są z łańcuchów tworzących trójwymiarową sieć. W stanie suchym łańcuchy te mają postać bezładnych, szczelnie zwiniętych kłębków. Pod wpływem wody obecne w nich anionowe grupy funkcyjne ulegają solwatacji i dysocjują. Prowadzi to do rozluźnienia kłębków, wchłaniania wody i ekspansji żelu. Zakończenie procesu następuje wówczas, gdy przestrzenie usieciowane łańcuchy ulegną maksymalnemu

wydłużeniu. Chłonność supersorbentów wyraża się w masie pochłoniętej wody odniesionej do masy suchego polimeru i sięga kilkudziesięciu g H₂O/g. Obecność elektrolitów i związków chemicznych zdolnych do reakcji z grupami funkcyjnymi polimeru pogarsza chłonność supersorbentów, które otrzymuje się najczęściej poprzez polimeryzację lub kopolimeryzację monomerów akryloamin i akrylanów w reakcjach w roztworze wodnym w obecności inicjatorów redoksowych. Zwykle supersorbenty polimerowe miesza się z podłożem oraz składnikami nawozowymi, uzyskując ekosorby w postaci żelów (amonowo-potasowych, amonowo-sodowych lub amonowo-sodowo-potasowych) lub proszków (potasowych, sodowych lub potasowo-sodowych). Wybrane właściwości złoża EKOSORB-100 wg danych producenta zamieszczono w tabeli 1.

Przedstawione w niniejszej pracy rezultaty badań dla złoża handlowego EKOSORB-100 dotyczą złoża częściowo nawilżonego o zawartości wilgoci około 50% mas.

3. Hydraulika złóż porowatych

Obszerny przegląd metod ujęcia hydrauliki złóż porowatych, w tym biologicznie czynnych, zamieszczono w [1]. Wynika z niego, że w przypadku technicznie stosowanych prędkości gazu rzędu 0,05÷0,1 m/s, w opisie oporów powinny występować zarówno człon laminarny, jak i przejściowy. Bardzo proste ujęcie Leva'y [2] z poprawką ma postać:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot H} = \alpha \cdot w^2 + \beta \quad (1)$$

i formalnie obowiązuje w zakresie przepływu burzliwego.

Ergun [3] proponuje obliczać opory przepływu z zależności:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot H} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{w \cdot \eta}{\rho \cdot d_e} + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{w^2}{d_e} \quad (2)$$

Wymaga ona znajomości średnicy ekwiwalentnej d_e , która w przypadku złóż naturalnych jest trudna do wyznaczenia. Dlatego Carman [4] wprowadza pojęcie przepuszczalności B_0 :

$$B_0 = \frac{1}{k \cdot S_0} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (3)$$

ujmującej równocześnie indywidualne dla każdego wypełnienia stałe k i S_0 .
Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska ————— 127

Tabela 1. Zestawienie niektórych własności złoża EKOSORB-100**Table 1.** Setting-up of some properties of the EKOSORB-100 bed

Właściwość złoża Properties of the bed	żelowego in a form of gel	w postaci proszku in a form of powder
Postać Features	miękki, kruchy żel, barwa żółtawa soft, brittle, yellowish gel	proszek barwy szarej grey powder
Zawartość substancji stałej [% mas] Solid material content [% mass]	18	95
Zdolność wchłaniania wody destylowanej [gH ₂ O/g] Absorption ability of distilled water [gH ₂ O/g]	40	150
pH odcieku wodnego pH of water eluateo	8,5 ÷ 10,5	8,5 ÷ 10,5
Gęstość usypowa [kg/m ³] Bulk density [kg/m ³]	800 ÷ 900	550 ÷ 650

Równanie to można przekształcić dla wypełnień włóknistych (do których zbliżone są zwykle złoża biofiltracyjne) do postaci:

$$B_0 = \frac{d_e^2}{16 \cdot k} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (4)$$

przy czym zestawienie k dla różnych ε zebrano w [5].
Wprowadzając (3) i (4) do (2) otrzymuje się równanie:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \rho} = k \cdot S_0^2 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\eta \cdot w}{\rho} + \frac{1,75}{\sqrt{150}} \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon)} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot S_0^2 \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3}} \cdot w^2 \quad (5)$$

a po rozwikłaniu tej zależności uzyskuje się równanie kwadratowe ze względu na $\sqrt{B_0}$:

$$B_0 - \frac{1,75}{\sqrt{150}} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{\varepsilon^{3/2}} \cdot \frac{H}{\Delta P} \cdot \sqrt{B_0} - \frac{\eta \cdot H \cdot w}{\Delta P} = 0, \quad (6)$$

którego rozwiązaniem fizykalnym jest:

$$B_0 = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1,75}{\sqrt{150}} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{\sqrt{\varepsilon^3}} \cdot \frac{H}{\Delta P} + \sqrt{\frac{1,75^2}{150} \cdot \frac{\rho^2 \cdot w^4 \cdot H^2}{\varepsilon^3 \cdot \Delta P^2} + 4 \cdot \frac{w \cdot \eta \cdot H}{\Delta P}} \right)^2 \quad (7)$$

Jeśli więc z indywidualnych pomiarów funkcji

$$\Delta P = f(w) \quad (8)$$

wyznać średnią wartość ze zbioru B_0 wyliczonego wg (7), opory przepływu można określić z zależności:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \rho} = \frac{\eta \cdot w}{\rho \cdot B_{0\text{śr}}} + \frac{1,75 \cdot w^2}{\sqrt{150 \cdot \varepsilon^3 \cdot B_{0\text{śr}}}} \quad (9)$$

Zamiast $B_{0\text{śr}}$ można w nim również użyć wartości B_0 uwzględniającej zmienność B_0 z prędkością.

Jeszcze inne ujęcie oporów przepływu zawiera propozycja Windspergera [6]. Otóż ujmuje on współczynnik oporów λ i współczynnik krętości porów ξ w postaci iloczynu:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot H} = \frac{3}{4} \cdot \lambda \cdot \xi \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot w^2}{d_e \cdot \varepsilon^3} \quad (10)$$

przy czym

$$\lambda = f(\text{Re}) = f\left(\frac{2 \cdot w \cdot d_e \cdot \rho}{3 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \eta}\right). \quad (11)$$

Proponuje on obliczanie tego iloczynu jako

$$\lambda \cdot \xi = 2,2 \cdot \left(\frac{0,4}{\varepsilon}\right)^{0,78} \cdot \left(\frac{64}{\text{Re}} + \frac{1,8}{\text{Re}^{0,1}}\right). \quad (12)$$

Zaletą takiego ujęcia jest możliwość wyliczenia d_e .

W niniejszej pracy wykorzystano te trzy sposoby do opracowania hydrauliki handlowego i nawilżonego złoża EKOSORB-100 z pomiarów spadku ciśnienia w funkcji liniowej prędkości gazu przez złoża. Należy tu wspomnieć, że średnicę zastępczą złożeń można też wyznaczyć metodą izoterm absorpcji. Taką metodę proponują dla złoża z torfu Kawalec-Pietrenko i Ścisłowski [7], uzyskując zbliżone wartości d_e do tych, które wynikają z metody hydraulicznej, ale dotyczą one jedynie złożeń nienawilżonych.

4. Instalacja doświadczalna

Głównym elementem instalacji jest kolumna o średnicy wewnętrznej 0,175 m, wypełniona złożem biofiltracyjnym. Wysokość czynna złoża wynosi 0,4÷0,46 m. W stosunku do instalacji opisanej szczegółowo w [1] wprowadzono kilka istotnych zmian.

Wyeliminowano przede wszystkim szereg elementów rurociągu doprowadzającego powietrze do kolumny, które dławily przepływ i ograniczały możliwości zwiększenia objętościowego natężenia przepływu przez kolumnę. Zmieniono usytuowanie króćców pomiaru spadku ciśnienia na złożu w ten sposób, że nie istniała konieczność odejmowania oporów pustej kolumny od wartości oporów przepływu, zmierzonych pomiędzy króćcami przed i za kolumną, tzn. mierzono bezpośrednio opory złoża, rusztu i gąbki zabezpieczającej złożo

przed przedostawaniem się do dolnej części biofiltru. Jak bowiem stwierdzono w niezależnych pomiarach, opory rusztu i gąbki w porównaniu z oporami złoża są pomijalne. W badaniach stężeń odorantu w powietrzu dochodzącym do rurociągu wlotowego wprowadzono element mieszający, dzięki czemu w całym przekroju poprzecznym rurociągu stężenie odorantu było równomierne. Zmodernizowano też węzeł dozowania odorantu poprzez użycie w termostacie nasycania powietrza w układzie barbotażowym. Zastosowano ponadto równoległy pomiar natężenia przepływu dokonywany przy użyciu kryzy i pomiar anemometryczny na wlocie do układu. W rezultacie tych zmian uzyskano znacząco większy zakres zmienności liniowej prędkości gazu przez złoża i większą precyzję pomiarów.

5. Rezultaty badań hydrauliki

Na podstawie określonych komputerowo objętościowych natężeń przepływu w warunkach pomiarowych wyznaczono liniową prędkość przepływu liczoną na niewypełniony przekrój kolumny jako

$$w = \frac{V}{F}. \quad (13)$$

Prędkości te sprawdzano bezpośrednim pomiarem anemometrycznym. Następnie sporządzano dla złoża handlowego i złoż o różnych stopniach nawilżenia zależności

$$\Delta P = f(w), \quad (14)$$

które prostowały się w przybliżeniu w przebadanym zakresie prędkości w układzie

$$\Delta P = f(w^2). \quad (15)$$

Aby skorzystać z poszczególnych ujęć hydrauliki operujących jednostkowym spadkiem ciśnienia, wyznaczano gęstość powietrza podawanego do kolumny w warunkach panujących na wlocie do kolumny, tzn. uwzględniano w powietrzu zawartość pary wodnej. Szczegółowy opis sposobu obliczeń znajduje się w [1]. Ponieważ w ujęciach Erguna [3] i Carmana [4], jak również Windspergera [6], jako jeden z parametrów występuje dynamiczny współczynnik lepkości η , dlatego parametr ten obliczano również z uwzględnieniem zawartości wilgoci w powietrzu.

Następnie wyznaczano wartości $\frac{\Delta P_{zm}}{\rho \cdot H}$ (dla wartości zmierzonych), $\frac{\Delta P_L}{\rho \cdot H}$ (dla wartości obliczanych zależnością (1)), $\frac{\Delta P_{B_{0sr}}}{\rho \cdot H}$ (przy wykorzystaniu uśrednionej ze wszystkich pomiarów średniej przepuszczalności złoża zgodnie z (9)), $\frac{\Delta P_{B_0}}{\rho \cdot H}$ (po wprowadzeniu poprawki uwzględniającej zmienność B_0 z prędkością) oraz $\frac{\Delta P_w}{\rho \cdot H}$ (dla wartości obliczanych zależnością (10)).

Skorygowaną przepuszczalność B_0 wyliczano jako:

$$B_0 = B_{0sr} + \Delta B_0 \quad (16)$$

$$\Delta B_0 = a w + b \quad (17)$$

przy czym stałe a i b określano doświadczalnie.

Procedurę taką przyjęto dla EKOSORBU-100 handlowego oraz dla wszystkich użytych w badaniach stopni nawilżenia złóż.

Występującą w zależnościach (9) i (10) porowatość ε wyznaczano w niezależnych badaniach metodą opisaną w [8], a wyniki tych badań pokazano na rys. 1. W ten sposób dla złoża handlowego oraz poszczególnych stopni nawilżenia złoża można było sporządzić charakterystyki hydrauliczne wg różnych ujęć. Zestawienie wyników tych charakterystyk znajduje się na wykresach - rys. 2÷6. Na rys. 7 sporządzono ponadto charakterystykę zbiorczą badań hydrauliki w układzie $\frac{\Delta P}{\rho \cdot H} = f(w^2)$, na której parametrem jest stopień nawilżenia złoża.

W tabeli 2 zamieszczono natomiast rezultaty badań porowatości średnich, co upoważniło do sporządzenia zależności doświadczalnej

$$\varepsilon = f(S) \quad (18)$$

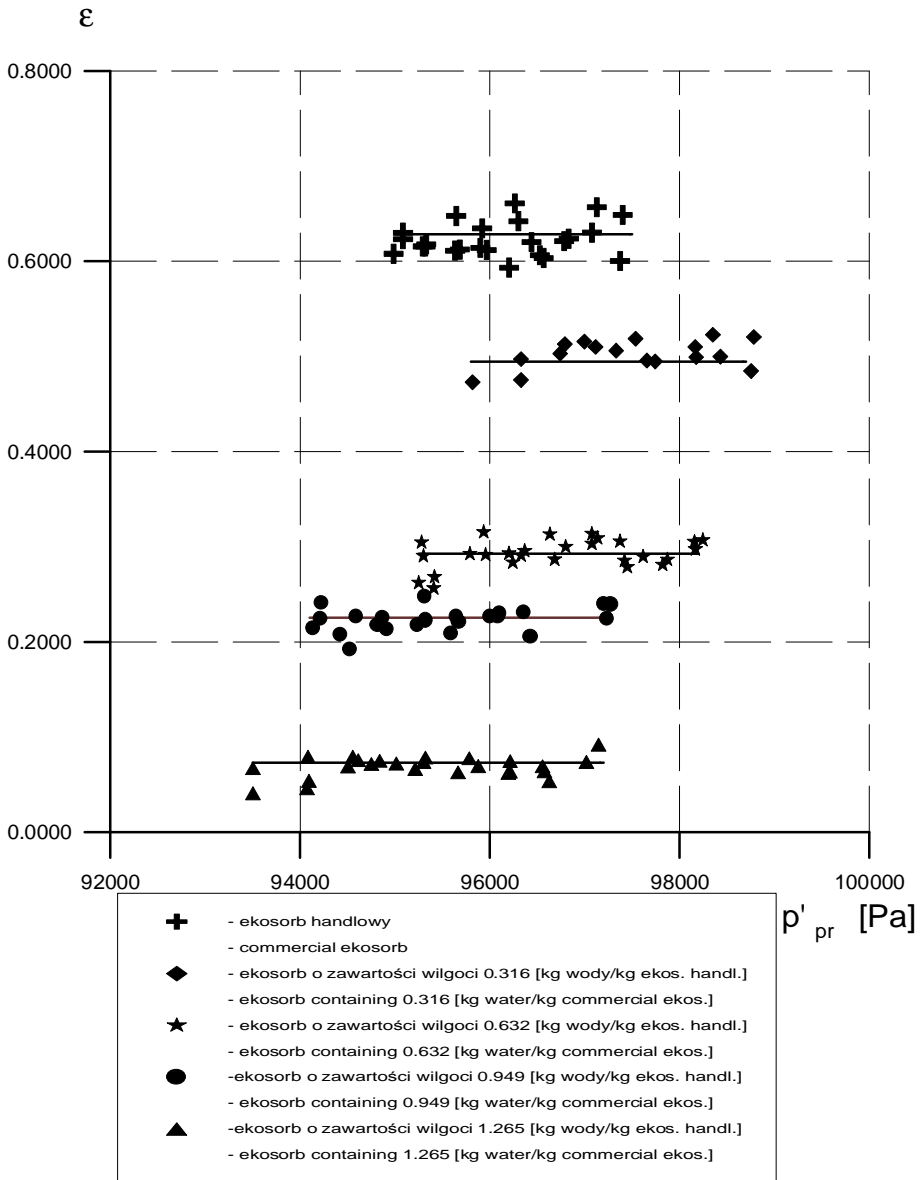
S - stopień nawilżenia złoża, którą opisano funkcją liniową

$$\varepsilon = -0,441 \cdot S + 0,6244 \quad (19)$$

przy czym obowiązuje ona w zakresie $\varepsilon = 0,6285 \div 0,0728$. Funkcję tę przedstawiono na rys. 8.

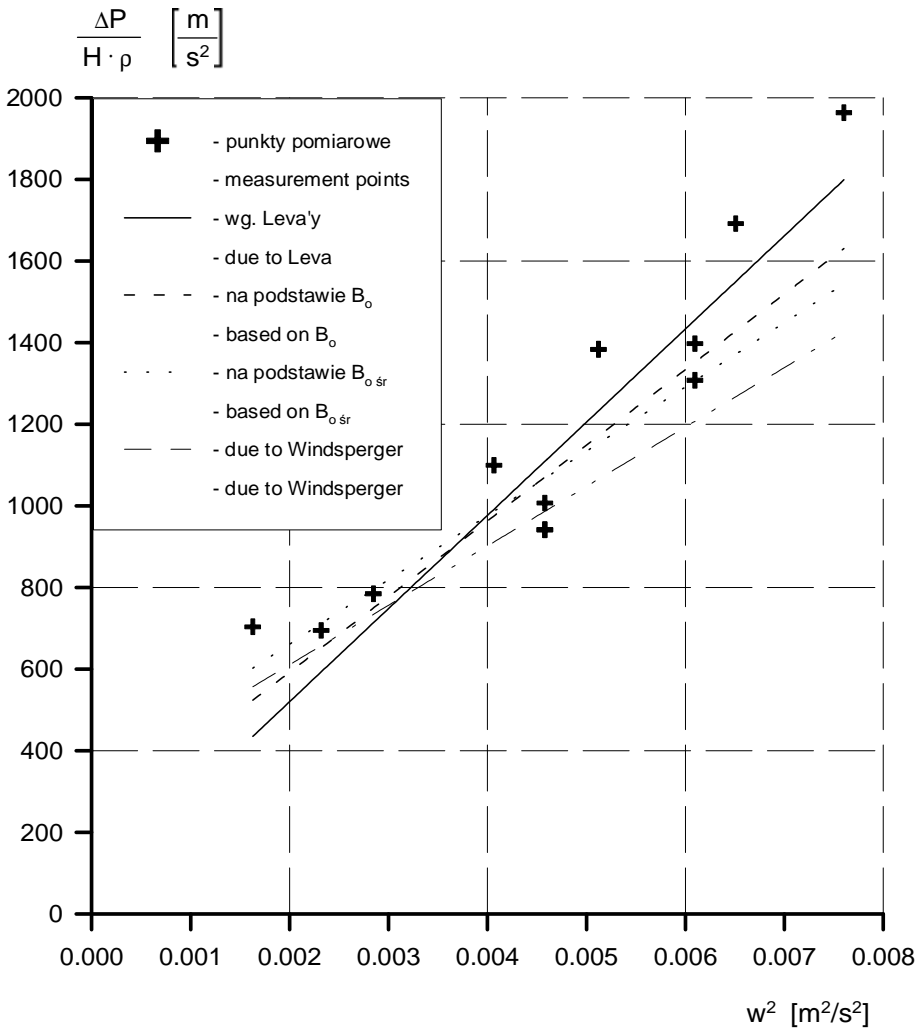
Tabela 2. Zestawienie wyznaczonych z badań wielkości hydraulicznych złoża handlowego i złożów nawilżonych EKOSORB-100
Table 2. Setting-up of hydraulic parameters of commercial and wetted EKOSORB-100 beds determined experimentally

Rodzaj złoża EKOSORB-100 Type of the EKOSORB-100 bed	ε_{sr} [m ³ /m ³]	$B_{0sr} \cdot 10^{10}$ [m ²]	$d_e \cdot 10^3$ [m]	a [m ² /m ³]	$\alpha \cdot 10^6$ [1/m] wg (1) due to (1)	$a \cdot 10^9$ [m/s] wg (17) due to (17)	$b \cdot 10^{10}$ [m ²] wg (17) due to (17)	Zakres Re Range of Re
Handlowe Commercial	0,6229	36,96	0,500	4461	22,8	-14,2	9,83	0,63 ÷ 1,17
o zawartości $0,316 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg zl. handl.}}$ containing $0,316 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg com.bed}}$	0,5074	27,01	0,836	3526	34,7	-20,6	14,3	0,59 ÷ 2,11
o zawartości $0,632 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg zl. handl.}}$ containing $0,632 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg com.bed}}$	0,2929	10,67	2,146	1977	1,44	-26,9	16,2	1,65 ÷ 2,37
o zawartości $0,949 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg zl. handl.}}$ containing $0,949 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg com.bed}}$	0,2223	5,739	2,887	1610	2,43	-9,68	5,51	1,30 ÷ 3,17
o zawartości $1,265 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg zl. handl.}}$ containing $1,265 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg com.bed}}$	0,0685	1,740	16,72	333	0,103	-2,85	1,10	5,61 ÷ 9,82



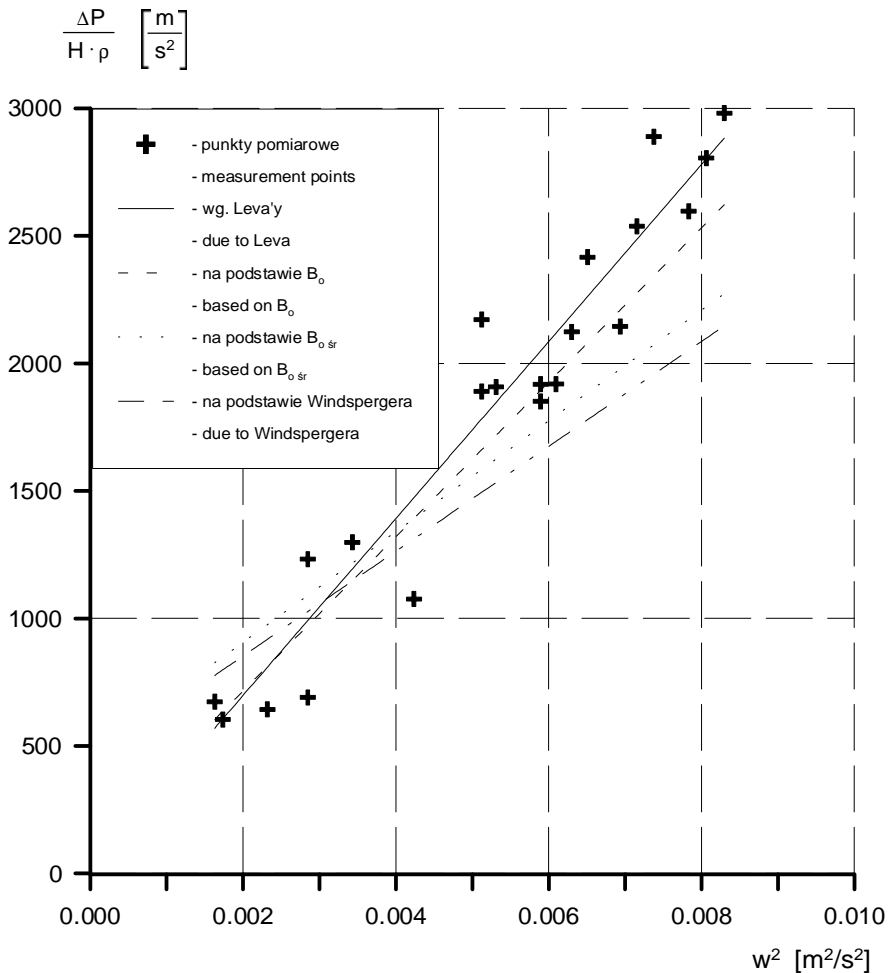
Rys. 1. Wykres zbiorczy zależności porowatości od ciśnienia próżni dla złoża EKO-SORB-100 przy różnych stopniach nawilżenia

Fig. 1. Cumulative plot of porosity vs vacuum pressure for the EKOSORB-100 bed at different wetting levels



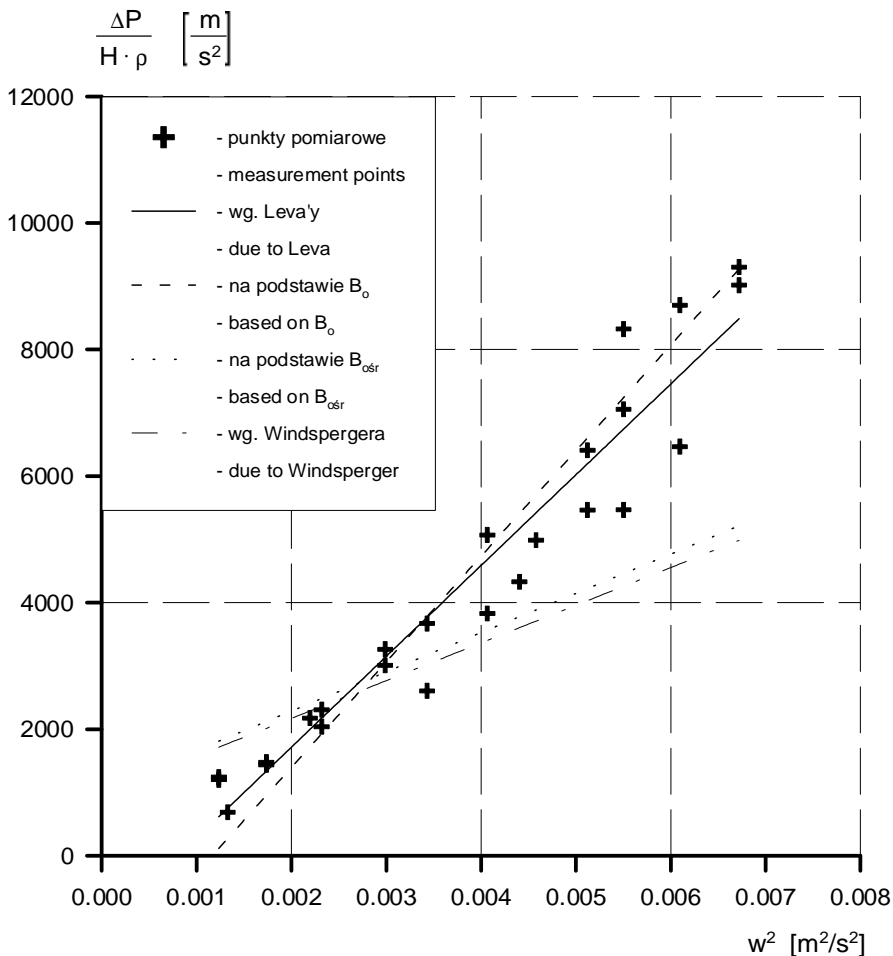
Rys. 2. Zależność $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ dla ekosorbu handlowego

Fig. 2. Dependence of $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ for the commercial EKOSORB



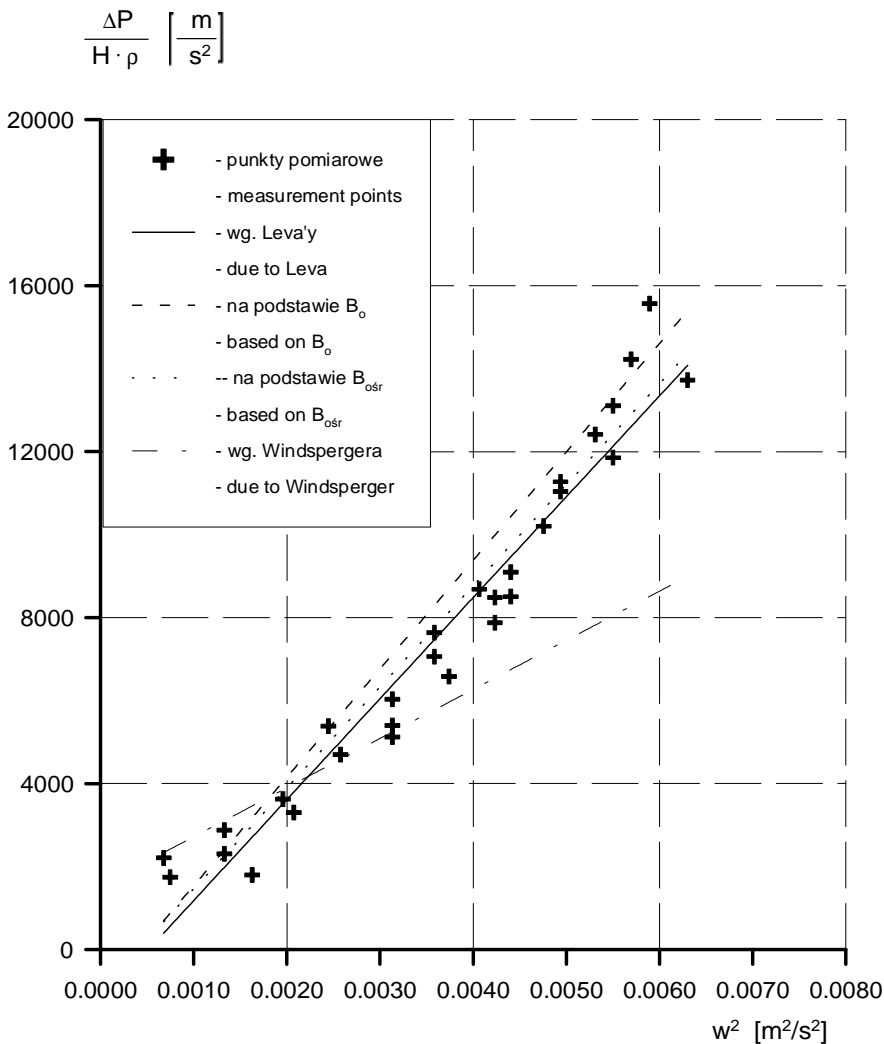
Rys. 3. Zależność $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ dla ekosorbu o zawartości wody 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Fig. 3. Dependence of $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ for the EKOSORB containing 0.316 [kg water/kg commercial EKOSORB]



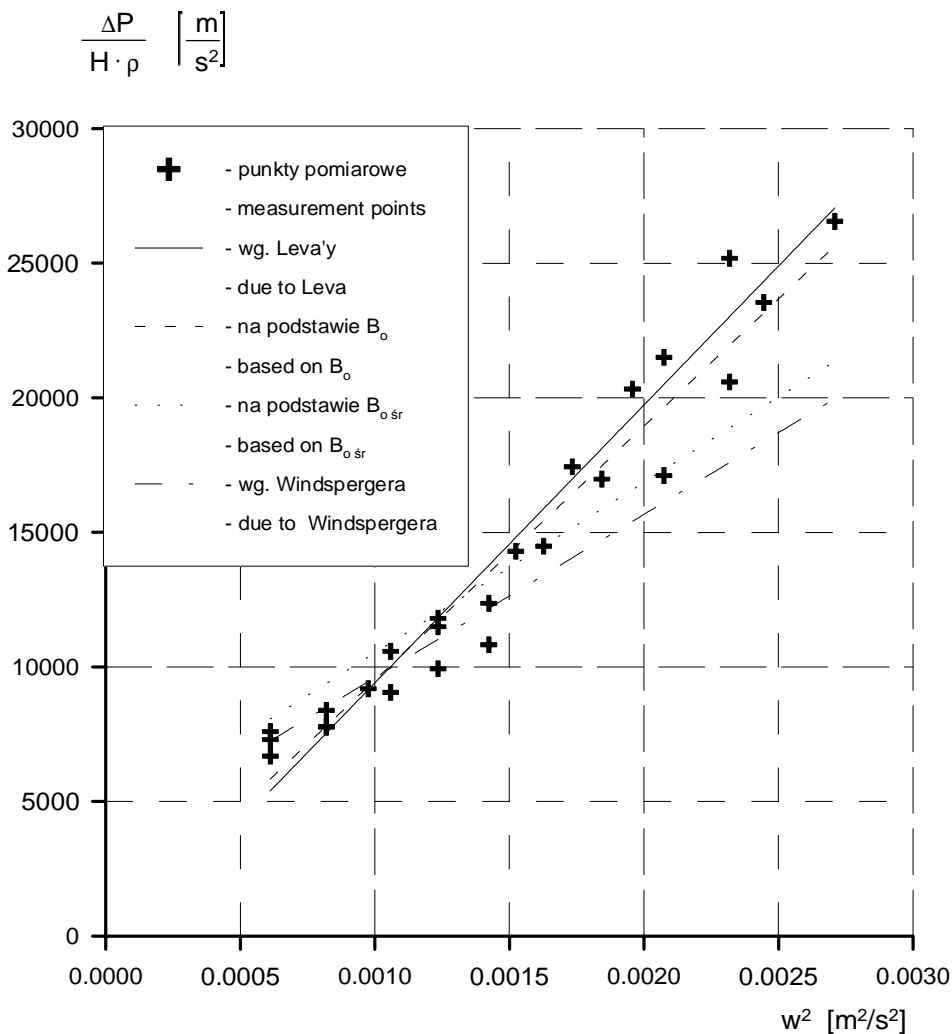
Rys. 4. Zależność $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ dla ekosorbu o zawartości wody 0,632 [kg wody/kg złoża handlowego]

Fig. 4. Dependence of $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ for the EKOSORB containing 0.632 [kg water/kg commercial EKOSORB]



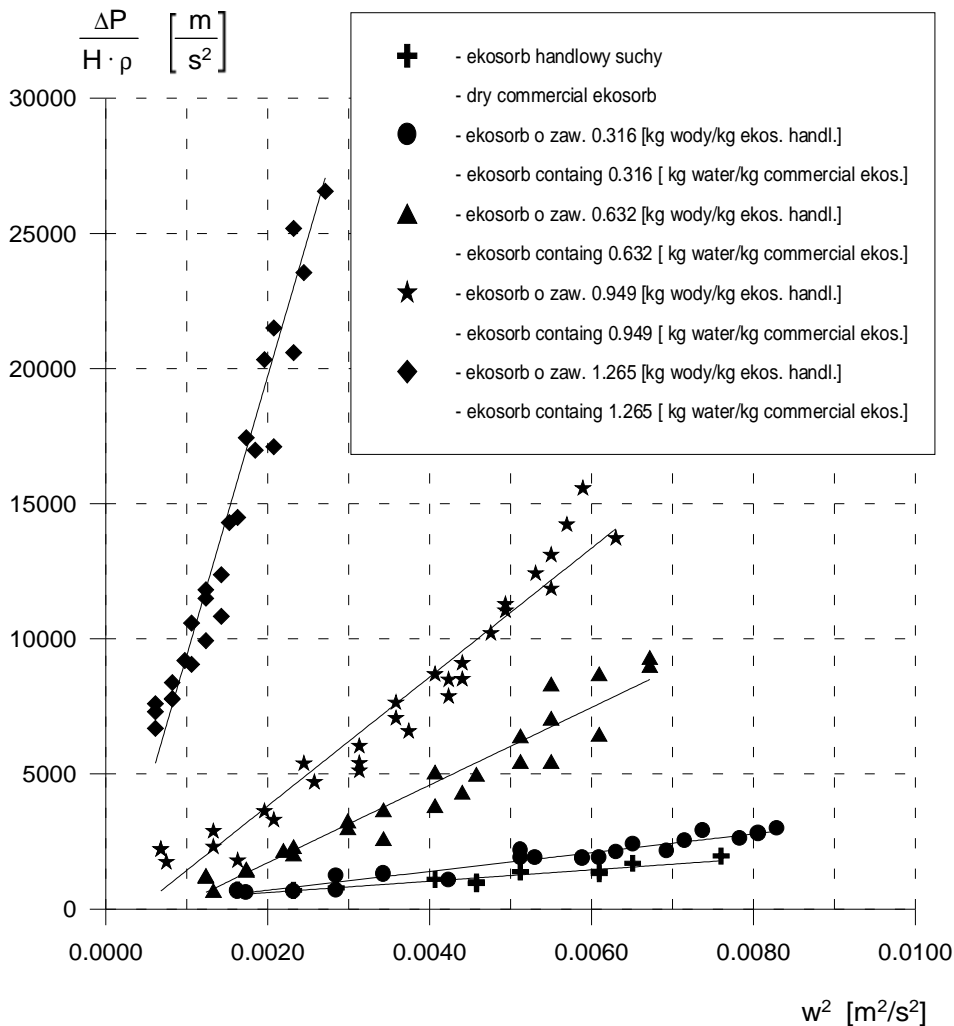
Rys. 5. Zależność $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ dla ekosorbu o zawartości wody 0,949 [kg wody/kg złoża handlowego]

Fig. 5. Dependence of $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ for the EKOSORB containing 0.949 [kg water/kg commercial EKOSORB]



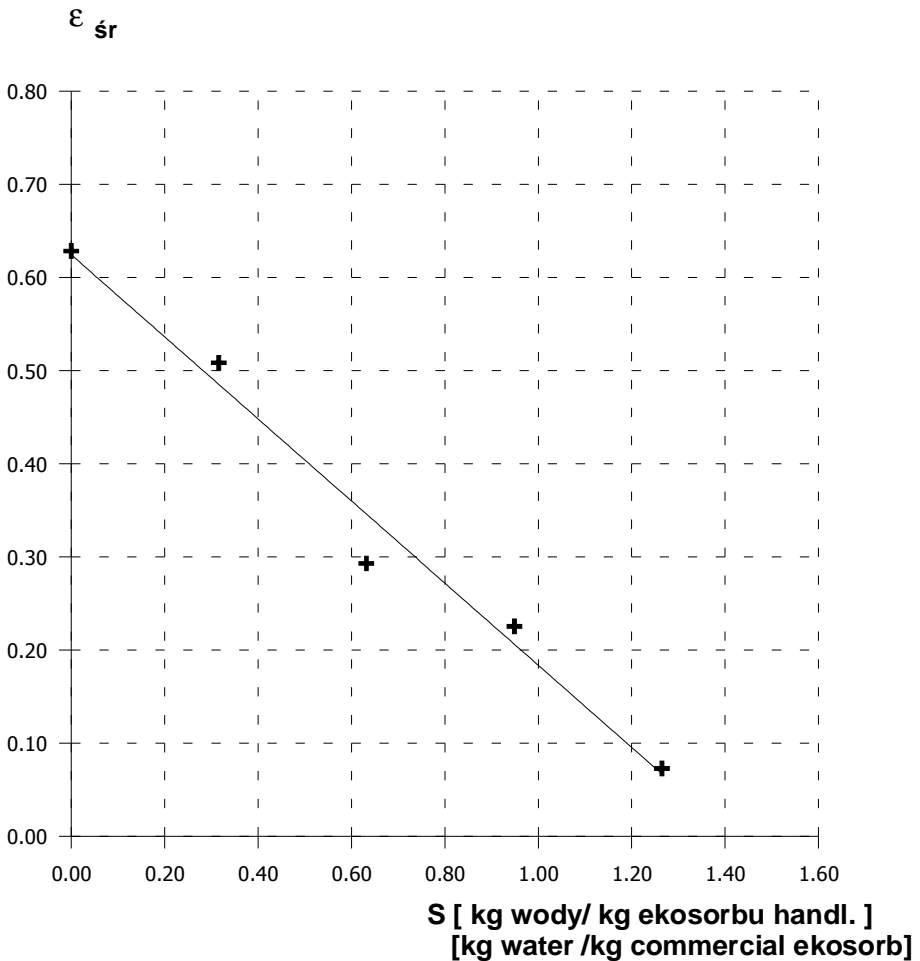
Rys. 6. Zależność $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ dla ekosorbu o zawartości wody 1,265 [kg wody/kg złoża handlowego]

Fig. 6. Dependence of $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ for the EKOSORB containing 1.265 [kg water/kg commercial EKOSORB]



Rys. 7. Zależność $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ dla ekosorbu handlowego i ekosorbu o różnym stopniu nawilżenia

Fig. 7. Dependence of $\Delta P/(H \cdot \rho) = f(w^2)$ for the commercial EKOSORB and the EKO-SORB at different wetting levels



Rys. 8. Zależność średnich porowatości ϵ w funkcji stopnia nawilżenia złoża $\epsilon = f(S)$.

Dla aproksymacji liniowej $\epsilon_{\text{śr}} = 0,624 - 0,4415 \cdot S$

Fig. 8. Dependence of the average porosity ϵ vs the wetting level of bed $\epsilon = f(S)$. For a linear approximation $\epsilon_{\text{śr}} = 0,624 - 0,4415 \cdot S$

Jak stwierdzono, większe nawilżenie złoża EKOSORB-100 powoduje również zmniejszenie jego przepuszczalności (co pokazano na rys. 9) oraz zmianę średnicy ekwiwalentnej wyliczonej zgodnie z [6] (rys. 10).

Analizując zależność (1) i współczynniki liczbowe α i β wyznaczone doświadczalnie można stwierdzić, że na opory przepływu zdecydowanie bardziej wpływa α niż β . Jeśli więc pominąć w (1) współczynnik poprawkowy β , to można sporządzić graficzną zależność (rys. 11)

$$\alpha = f(S) \quad (20)$$

i w przypadku innego stopnia nawilżenia, niż podczas badań, interpolować α , uzyskując prosty i obowiązujący z dobrą dokładnością wzór na opory przepływu przez złożo EKOSORB-100 o zadanym nawilżeniu. Warto tu również zauważyć, że stosowanie zbyt wysokich nawilżeń powoduje tak duże zmniejszenie przepuszczalności i wzrost oporów przepływu, że z punktu widzenia biofiltracji stawia to pod znakiem zapytania celowość takiej metody ze względów ekonomicznych.

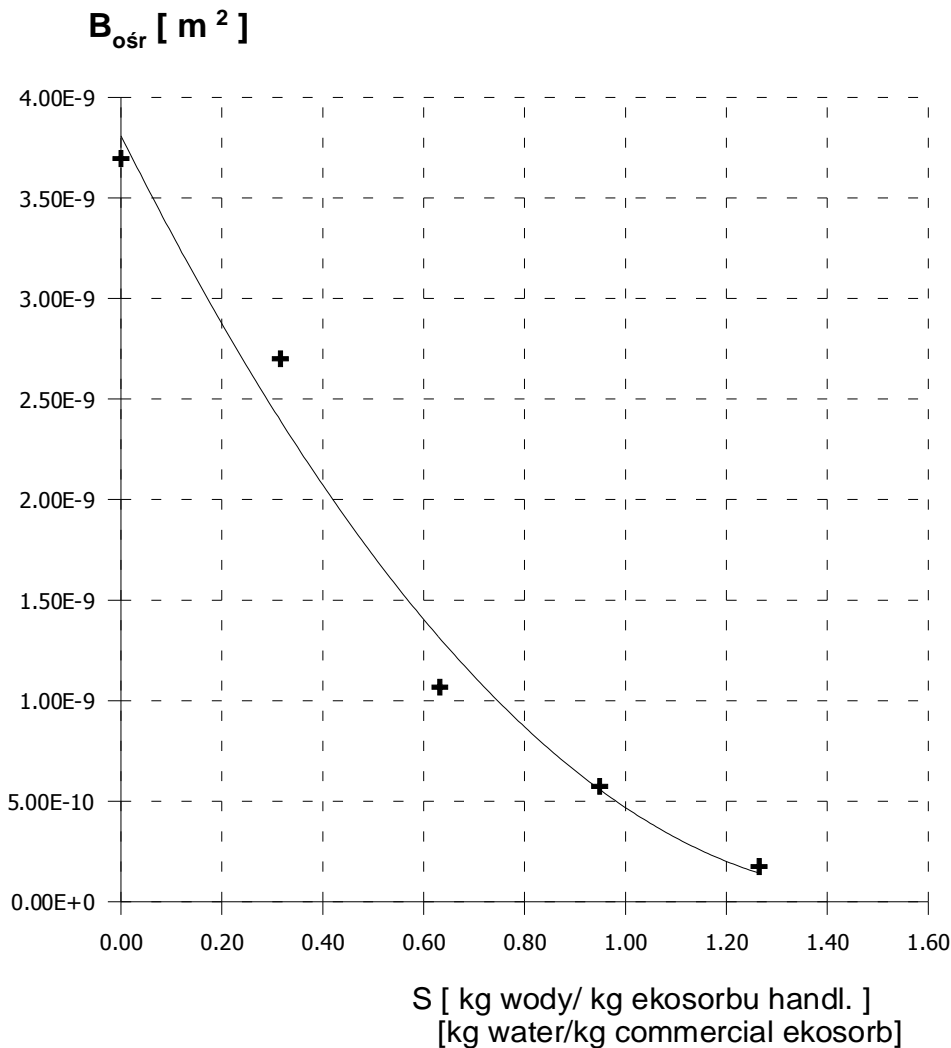
6. Biofiltracja trietyloaminy

Doświadczenia związane z biofiltracją trietyloaminy na złożu kompostowym [9], przeprowadzonym złożu po produkcji pieczarek, rozdrobnionej korze z drzew liściastych i słomie pszenicznej [10,11,12], zrębach drzewnych [13] i torfie [14] sugerowały, by sprawdzić również kinetykę biofiltracji na złożu modyfikowanym EKOSORB-100.

Przyjęto zakres zmienności koncentracji wlotowej trietyloaminy równy $0,2 \div 107 \text{ mg/m}^3$ i objętościowego natężenia przepływu gazu przez kolumnę około $3,5 \div 7 \text{ nm}^3/\text{h}$, co odpowiada liniowej prędkości przepływu gazu, liczonej na niewypełniony przekrój kolumny $w \approx 0,04 \div 0,081 \text{ m/s}$. Pomiar koncentracji przed i za kolumną prowadzono metodą chromatografii gazowej, przy czym posłużono się w badaniach chromatografem Chrom-5 firmy Laboratorni Pristroje Praha, wyposażonym w detektor płomienno-jonizacyjny FID, rejestrator TZ-4221 i integrator IT-2 z drukarką. Do analizy użyto kolumny szklanej wypełnionej 28% Penwaltem 223 + 4% KOH.

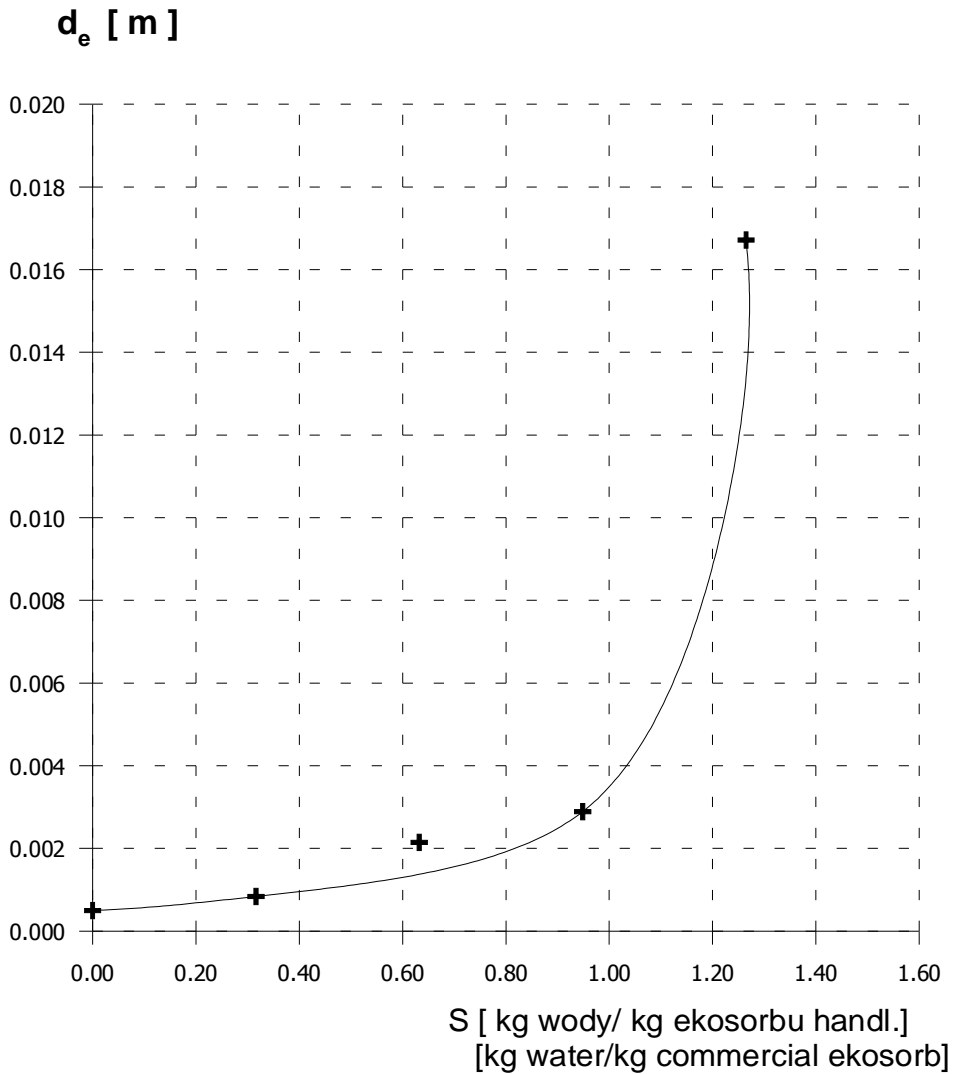
Badania biodegradacji prowadzono dla stopnia nawilżenia złoża $S = 0,316$ [$\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}$ złoża handlowego] wychodząc z założenia, że większe nawilżenie powoduje zbyt ni wzrost oporów przepływu.

Przyjęto periodyczny system pracy kolumny (w systemie jednozmianowym), przy czym pomiary właściwe prowadzono po około 2 godz. od włączenia instalacji (podawania zanieczyszczonego powietrza). Założony w badaniach zakres zmienności stężeń trietyloaminy odpowiadał wielkościom odorowym, stąd nie istniała możliwość określenia pełnej kinetyki biodegradacji odorantu, a jedynie fragmentu liniowego odcinka tej kinetyki, dla której, zgodnie z wcześniejszymi cytowanymi pracami [9÷14], obowiązuje prawo Michaelis-Menten dla niskich stężeń. Metodyka badań została opisana szczegółowo w [10,11].



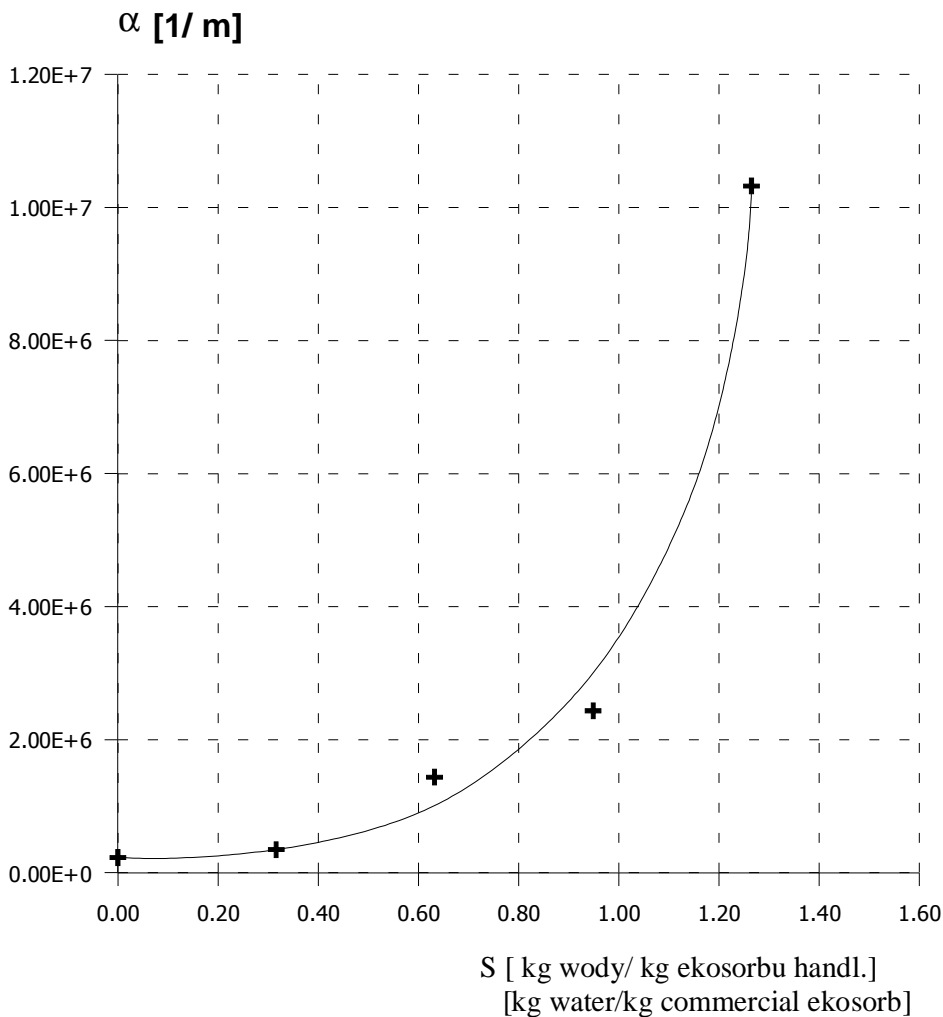
Rys. 9. Zależność średnich przepuszczalności B_{0sr} wyliczonych wg (7) w funkcji stopnia nawilżenia złoża. Dla aproksymacji parabolicznej $B_{0sr} = (1,67 - 5,01 \cdot S + 3,81 \cdot S^2) \cdot 10^{-9} [m^2]$

Fig. 9. Dependence of the average permeability B_{0sr} calculated based on (7) vs the bed wetting. For a parabolic approximation $B_{0sr} = (1.67 - 5.01 \cdot S + 3.81 \cdot S^2) \cdot 10^{-9} [m^2]$



Rys. 10. Zależności średnich średnic ekwiwalentnych złóż EKOSORB-100 wycieczonych wg [6] w funkcji stopnia nawilżenia złoża

Fig. 10. Dependences of average equivalent diameters of EKOSORB-100 beds calculated based on [6] vs the wetting level



Rys. 11. Zależność współczynnika kierunkowego α funkcji (1) od stopnia nawilżenia złoża

Fig. 11. Dependence of the slope coefficient α in Eq. (1) vs the wetting level of bed

Celem badań biodegradacyjnych było sporządzenie zależności szybkości biodegradacji \dot{V}_r w funkcji obciążenia złoża \dot{O} i koncentracji wlotowej C_1 , przy czym:

$$\dot{V}_r = \frac{C_1 - C_2}{\tau_k} \quad (21)$$

$$\dot{O} = \frac{C_1}{\tau_k} \quad (22)$$

Występujący w (21) i (22) czas kontaktu τ_k wyznaczano jako

$$\tau_k = \frac{V}{\dot{V}} \quad (23)$$

gdzie:

V - objętość złoża,

\dot{V} - objętościowe natężenie przepływu gazu na wlocie do kolumny.

Wyliczano również skuteczność biodegradacji η

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} = \frac{\dot{V}_r}{\dot{O}}, \quad (24)$$

która przy przyjęciu, że stężenie równowagowe odorantu na wylocie z kolumny jest zerowe, odpowiada sprawności procesu.

Pozwoliło to sporządzić zależności

$$\eta = f(\dot{O}) \quad (25)$$

$$\eta = f(C_1). \quad (26)$$

Rezultaty tych pomiarów i obliczeń znajdują się w [15]^{*)}. Zestawienie wyników badań zamieszczono w tabeli 3, przy czym rezultaty badań, oparte o 183 oznaczenia przedstawiono na rysunkach 12÷15.

^{*)} Autorzy dziękują tutaj Pani mgr inż. Sylwii KRÓL za wyrażenie zgody na skorzystanie z wyników Jej pracy dyplomowej magisterskiej

Tabela 3. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Table 3. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

Nr No.	τ_k [s]	C_1 [mg/m ³]	C_2 [mg/m ³]	η [%]	\dot{O} [mg/m ³ ·s]	\dot{V}_r [mg/m ³ ·s]
1	2	3	4	5	6	7
1	6,74	367,0	0,0	100,00	50,0	50,0
2	7,22	357,4	7,7	97,85	50,0	50,0
3	6,87	318,8	0,0	100,00	50,0	50,0
4	7,02	325,2	50,4	84,50	50,0	40,0
5	6,74	340,0	22,4	93,41	50,0	50,0
6	6,92	333,7	0,0	100,00	48,2	48,2
7	6,52	304,9	4,7	98,48	46,8	46,0
8	7,07	328,0	0,0	100,00	46,4	46,4
9	6,92	311,2	34,6	88,88	45,0	39,4
10	6,92	285,1	31,5	88,96	41,2	36,6
11	6,92	273,3	14,2	94,80	39,5	37,4
12	6,92	289,2	65,5	77,35	41,8	32,3
13	6,78	325,0	0,0	100,00	47,9	47,9
14	6,78	331,7	31,7	90,44	48,9	44,2
15	6,65	304,4	0,0	100,00	45,8	45,8
16	6,74	353,4	16,6	95,31	52,4	50,0
17	6,88	346,2	4,4	98,73	50,4	49,7
18	6,88	315,6	11,8	96,26	45,9	44,2
19	6,88	318,3	45,7	85,64	46,3	39,7
20	6,74	323,4	43,5	86,55	48,0	41,5
21	6,88	301,4	55,6	81,55	43,8	35,8

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
22	6,88	285,6	22,1	92,26	41,5	38,3
23	7,02	337,3	30,7	90,90	48,1	43,7
24	6,88	715,1	73,7	89,69	104,0	93,3
25	6,88	808,6	58,0	92,83	117,6	100,9
26	6,88	825,2	119,9	85,47	120,0	102,6
27	6,88	791,2	83,4	89,46	115,1	102,9
28	6,87	802,5	67,3	91,61	116,8	107,0
29	6,87	794,8	70,5	91,13	115,7	105,4
30	6,87	694,1	14,6	97,90	101,0	98,9
31	6,87	817,4	67,5	91,74	118,9	109,1
32	6,87	752,8	31,3	95,84	109,5	105,0
33	6,87	741,1	26,6	96,41	107,8	104,0
34	6,87	837,5	71,0	91,52	121,9	111,5
35	6,87	783,5	51,9	93,38	114,0	106,5
36	6,87	785,4	49,3	93,72	114,3	107,1
37	6,86	803,9	20,6	97,44	117,2	114,2
38	6,86	712,3	79,5	88,84	103,9	92,3
39	6,86	739,8	96,9	86,90	107,9	93,7
40	6,86	842,3	206,7	75,46	122,8	92,7
41	6,86	780,6	171,5	78,03	113,8	88,8
42	6,86	788,5	140,2	82,22	115,0	94,5
43	6,86	830,2	50,5	93,92	121,1	113,7
44	6,86	688,8	113	83,84	100,4	84,2
45	6,86	789,5	118,8	84,95	115,1	97,8

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
46	6,86	696,4	145,9	79,05	101,5	80,3
47	6,86	770,5	123,8	83,93	112,3	94,3
48	6,86	1566,4	13,1	99,16	228,4	226,5
49	6,86	1742,8	16,7	99,04	254,1	251,7
50	6,86	1325,0	0,0	100,00	193,2	193,2
51	6,86	1570,8	0,0	100,00	229,0	229,0
52	6,86	1546,2	0,0	100,00	225,5	225,5
53	6,86	1595,2	0,0	100,00	232,6	232,6
54	6,86	1499,5	0,0	100,00	218,6	218,6
55	6,86	1586,9	0,0	100,00	231,4	231,4
56	6,86	1533,9	0,0	100,00	223,7	223,7
57	6,88	1424,9	0,0	100,00	207,2	207,2
58	6,88	1731,4	0,0	100,00	250,9	250,9
59	6,88	1431,4	0,0	100,00	208,1	208,1
60	6,88	1474,8	7,2	99,51	214,5	213,4
61	6,88	1557,4	0,0	100,00	226,5	226,5
62	6,88	1622,8	0,0	100,00	236,0	236,0
63	6,88	1585,8	0,0	100,00	230,6	230,6
64	6,88	1810,7	0,0	100,00	263,3	263,3
65	6,88	1638,7	7,9	99,52	238,3	237,1
66	6,88	1731,3	0,0	100,00	251,8	251,8
67	7,15	812,2	0,0	100,00	113,6	113,6
68	6,87	809,5	5,4	99,33	117,8	117,0
69	6,87	779,4	104,0	86,66	113,4	98,3

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
70	6,87	806,4	82,2	89,81	117,4	105,4
71	6,87	751,9	66,9	91,10	109,4	99,7
72	7,04	2336,2	0,0	99,67	331,6	330,6
73	7,04	2467,1	0,0	100,00	350,2	350,2
74	6,91	2595,8	0,0	100,00	375,9	375,9
75	6,91	2304,8	0,0	100,00	333,7	333,7
76	7,04	2369,2	0,0	100,00	336,3	336,3
77	6,91	2414,5	0,0	100,00	349,6	349,6
78	6,91	2459,4	0,0	100,00	356,1	356,1
79	6,91	2422,3	0,0	100,00	350,7	350,7
80	6,91	2544,5	0,0	100,00	368,4	368,4
81	6,91	2549,0	0,0	100,00	369,1	369,1
82	6,91	3780,8	0,0	100,00	547,5	547,5
83	6,91	4213,1	0,0	100,00	610,0	610,0
84	6,91	4236,3	0,0	100,00	613,4	613,4
85	6,91	4079,6	0,0	100,00	590,7	590,7
86	7,15	4390,5	0,0	100,00	614,0	614,0
87	7,44	4469,2	0,0	100,00	600,9	600,9
88	7,44	4654,1	0,0	100,00	625,8	625,8
89	7,29	3950,3	10,6	99,73	541,8	527,3
90	7,29	4862,0	22,3	99,54	666,8	663,8
91	7,44	4988,6	37,9	99,24	670,8	665,7
92	7,44	5046,1	0,0	100,00	678,5	678,5
93	7,53	20245,9	0,0	100,00	2688,9	2688,9

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
94	7,38	16847,8	0,0	100,00	2283,3	2283,3
95	7,38	16494,8	0,0	100,00	2235,4	2235,4
96	7,38	16187,4	0,0	100,00	2193,8	2193,8
97	7,38	16939,6	0,0	100,00	2295,7	2295,7
98	7,38	15176,4	0,0	100,00	2056,8	2056,8
99	7,38	16312,4	0,0	100,00	2210,7	2210,7
100	7,38	15506,9	0,0	100,00	2101,5	2101,5
101	7,38	84076,0	0,0	100,00	11456,5	11456,5
102	7,33	99162,0	7,9	99,99	13522,9	13521,8
103	7,33	101479,0	0,0	100,00	13838,9	13838,9
104	7,33	102534,6	57,4	99,94	13982,8	13975,0
105	7,33	98347,4	0,0	100,00	13411,8	13411,8
106	7,33	100921,7	0,0	100,00	13762,9	13762,9
107	7,33	101328,1	0,9	100,00	13818,3	13818,2
108	7,33	106049,2	0,0	100,00	14172,8	14172,8
109	7,48	97417,6	5,9	99,99	13550,9	13550,1
110	7,19	95828,8	2,6	99,99	13068,3	13068,0
111	7,33	495,8	85,2	82,82	48,5	40,2
112	10,23	542,6	87,4	83,89	53,1	44,5
113	10,23	570,7	55,3	90,31	55,8	50,4
114	10,23	556,8	91,3	83,60	54,5	45,5
115	10,23	553,1	103,6	81,27	54,1	44,0
116	10,23	497,3	84,5	83,00	50,0	41,5
117	9,94	547,7	103,2	81,16	53,6	43,5

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
118	10,23	1154,5	0,0	100,00	111,0	111,0
119	10,40	1353,8	284,0	79,02	130,1	102,8
120	10,40	1586,5	181,7	88,55	152,5	135,0
121	10,40	1647,4	146,2	91,13	158,4	144,3
122	10,40	1327,2	160,3	87,92	127,6	112,2
123	10,40	1519,9	165,7	89,10	146,1	130,2
124	10,04	2530,9	64,5	97,45	252,0	245,5
125	10,40	2488,2	53,7	97,84	239,2	234,0
126	10,40	2932,2	0,0	100,00	281,9	281,9
127	10,40	2529,2	33,7	98,67	243,1	239,9
128	10,40	2564,7	0,0	100,00	246,5	246,5
129	10,27	5349,4	0,0	100,00	520,7	520,7
130	10,27	5622,5	2,2	99,96	547,3	547,1
131	10,27	5898,7	0,0	100,00	574,2	574,2
132	10,27	5910,5	0,0	100,00	575,4	575,4
133	10,27	5475,1	85,0	98,45	533,0	524,7
134	10,27	5756,1	0,0	100,00	560,3	560,3
135	10,27	5710,8	0,0	100,00	555,9	555,9
136	10,27	5353,9	0,0	100,00	521,2	521,2
137	10,27	5671,5	0,0	100,00	552,1	552,1
138	10,27	5666,3	0,0	100,00	551,6	551,6
139	9,99	19460,9	44,7	99,77	1947,5	1943,0
140	9,99	15772,5	0,0	100,00	1578,4	1578,4
141	9,99	16694,4	0,0	100,00	1670,7	1670,7

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

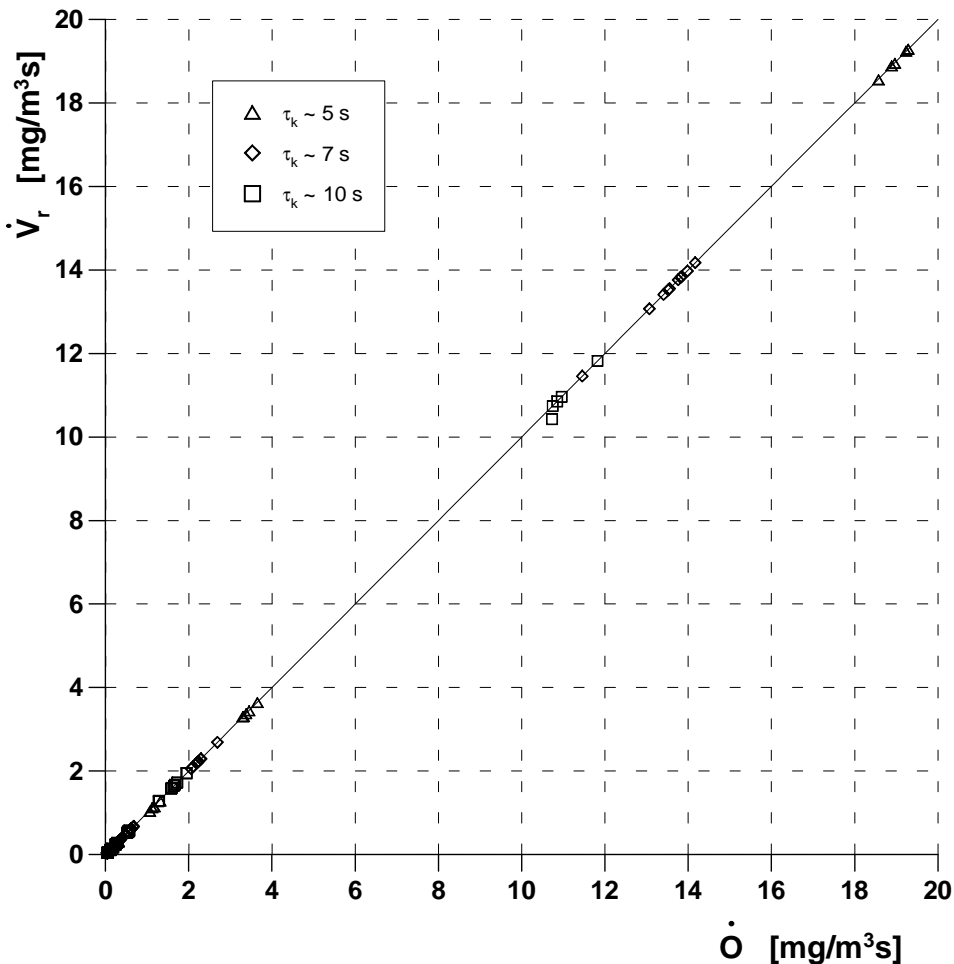
Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
142	9,99	12750,6	0,0	100,00	1276,0	1276,0
143	9,99	12922,0	0,0	99,88	1293,1	1291,6
144	9,99	19493,0	0,0	100,00	1950,7	1950,7
145	9,99	16417,7	0,0	100,00	1643,0	1643,0
146	9,99	17180,7	0,0	100,00	1719,3	1719,3
147	9,99	17269,0	0,0	100,00	1728,2	1728,2
148	9,99	15983,3	0,0	99,97	1599,5	1599,1
149	9,60	113547,1	24,8	99,98	11824,1	11821,5
150	9,88	108259,8	0,0	100,00	10960,2	10960,2
151	9,60	104223,9	31,3	99,97	10853,3	10850,0
152	9,60	103021,0	8,6	99,99	10728,0	10429,0
153	9,88	106117,4	25,2	99,98	10743,3	10740,8
154	4,94	240,5	32,8	86,36	48,7	42,1
155	5,01	244,0	7,2	97,05	48,7	47,3
156	5,01	255,4	29,4	88,49	51,0	45,1
157	5,01	238,2	23,5	90,13	47,5	42,9
158	5,01	230,3	51,0	77,86	46,0	35,8
159	5,25	941,8	89,4	90,51	179,3	162,3
160	5,17	915,1	56,8	93,79	176,9	165,9
161	5,10	1134,6	0,0	100,00	222,6	222,6
162	5,17	951,8	0,0	100,00	184,0	184,0
163	5,33	920,2	0,0	100,00	172,6	172,6
164	5,17	1574,5	13,0	99,17	304,4	301,9
165	5,17	1596,9	6,4	99,60	308,7	307,5

Tabela 3. cd. Wyniki badań oczyszczania powietrza i kinetyki rozkładu trietyloaminy na złożu EKOSORB-100 o nawilżeniu 0,316 [kg wody/kg złoża handlowego]

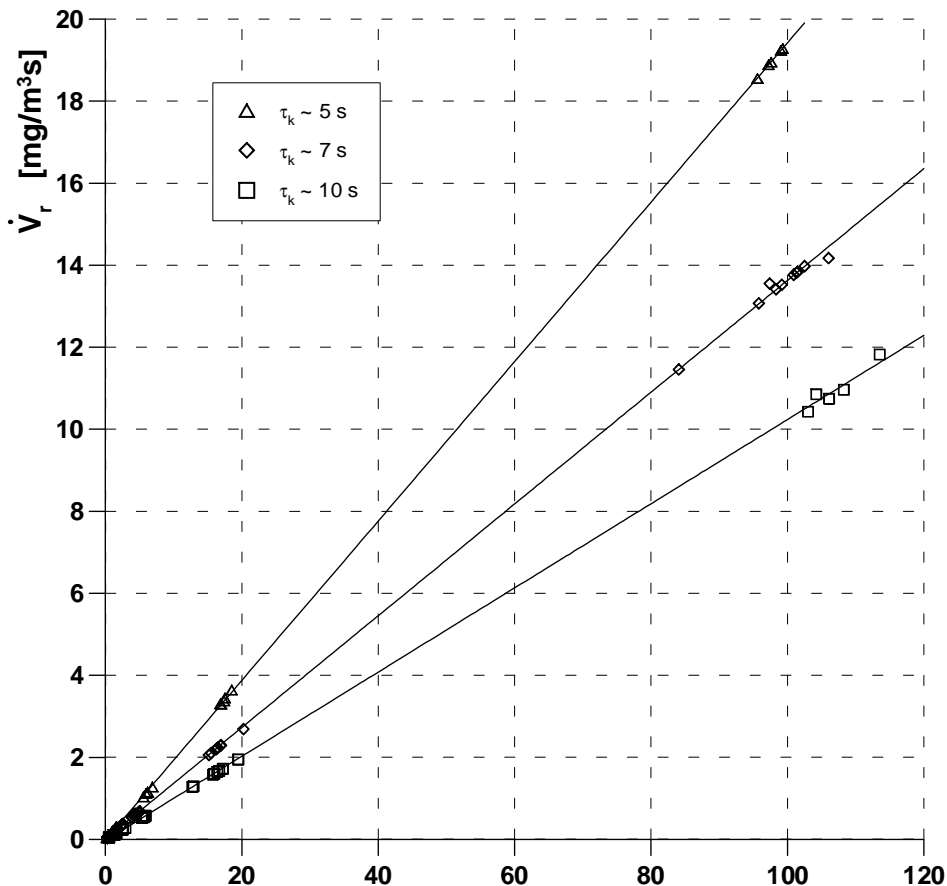
Table 3. contd. Experimental results of air cleaning and decomposition kinetics of triethylamine in the EKOSORB-100 bed containing 0.316 [kg water/kg commercial bed]

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
166	5,17	1529,2	12,4	99,19	295,8	293,2
167	5,17	1623,6	2,5	99,85	313,9	313,4
168	5,25	1592,4	0,0	100,00	303,2	303,2
169	5,22	6881,5	220,2	96,85	1319,1	1276,9
170	5,30	6228,8	161,5	97,41	1175,9	1145,4
171	5,22	5569,9	177,9	96,81	1067,7	1033,6
172	5,30	6175,0	71,3	98,85	1165,8	1152,3
173	5,30	5944,8	22,9	99,44	1122,3	1118,0
174	5,07	18504,9	33,1	99,82	3647,1	3640,6
175	5,07	16843,7	83,7	99,50	3319,7	3303,2
176	5,07	17517,2	33,1	99,81	3452,4	3445,9
177	5,15	16978,4	16,4	99,90	3297,7	3294,6
178	5,15	17385,0	19,5	99,89	3376,7	3372,9
179	5,15	95612,3	93,3	99,90	18570,9	18552,8
180	5,15	97253,7	0,0	100,00	18889,7	18889,7
181	5,15	97647,5	69,5	99,93	18966,2	18952,0
182	5,15	99300,0	0,0	100,00	19287,2	19287,2
183	5,15	99056,4	0,0	100,00	19239,8	19239,8



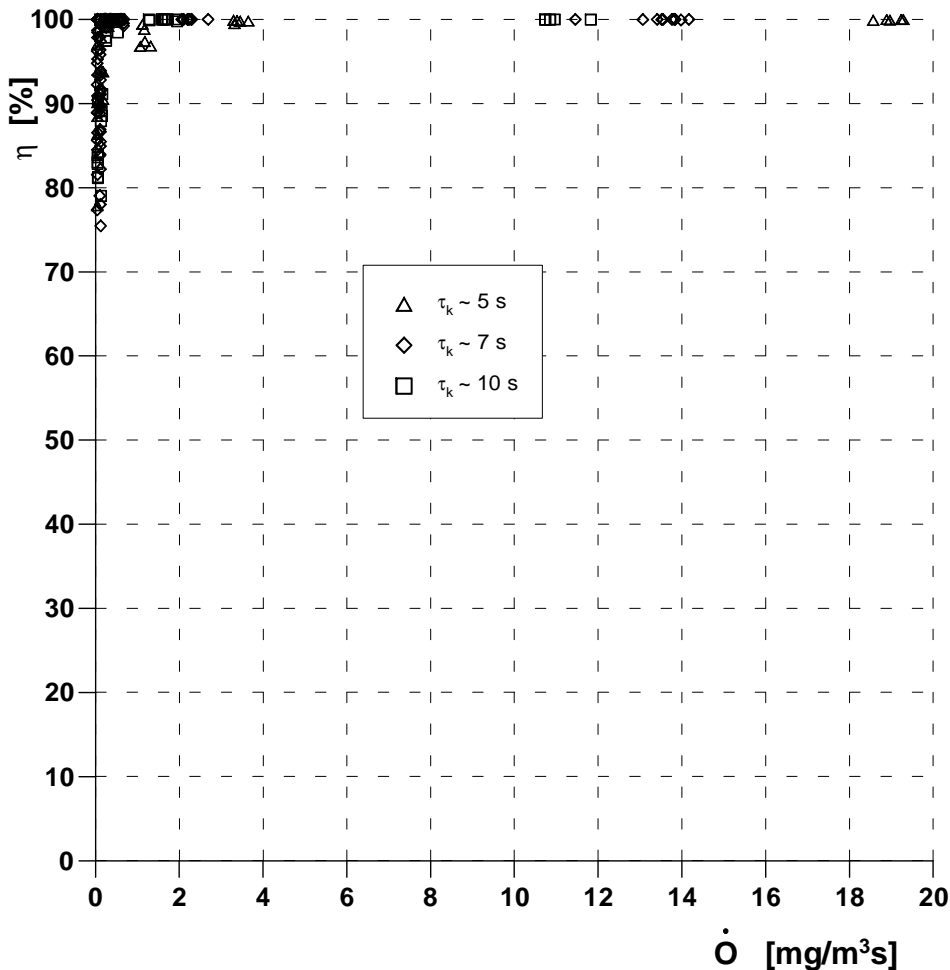
Rys. 12. Zależność szybkości biofiltracji trietyloaminy od obciążenia złoża EKOSORB-100 o stopniu nawilżenia $S = 0,316$ [kg wody/kg ekosorbu handlowego] przy poszczególnych czasach kontaktu w zakresie stężeń na wlocie do kolumny $C_I = 0,2 \cdot 10^7$ mg/m³

Fig. 12. Dependence of the biofiltration rate of triethylamine vs the loading of the EKOSORB-100 bed at wetting level $S = 0.316$ [kg water/kg commercial EKOSORB], for given contact time in the concentration level at the column inlet equal to $C_I = 0.2 \cdot 10^7$ mg/m³



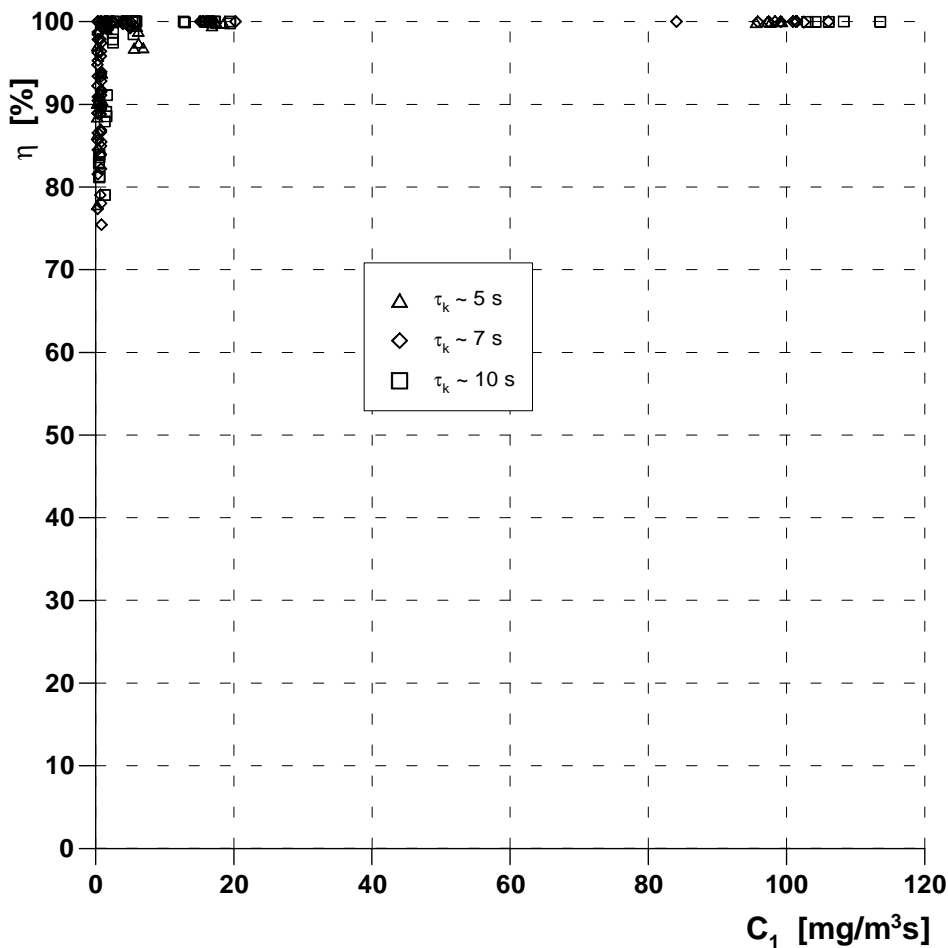
Rys. 13. Zależność szybkości biodegradacji trietyloaminy od stężenia na wlocie do kolumny ze złożem EKOSORB-100 o stopniu nawilżenia $S = 0,316$ [kg wody/kg ekosorbu handlowego] przy poszczególnych czasach kontaktu

Fig. 13. Dependence of the biodegradation rate of triethylamine vs concentration in the column inlet, for the column packed with the EKOSORB-100 at the wetting level $S = 0.316$ [kg water/kg commercial EKOSORB], at particular contact times



Rys. 14. Zależność skuteczności biofiltracji trietyloaminy od obciążenia złoża EKO-SORB-100 o stopniu nawilżenia $S = 0,316$ [wody/kg ekosorbu handlowego] przy poszczególnych czasach kontaktu w zakresie stężeń na wlocie do kolumny $C_1 = 0,2 \div 107$ mg/m^3

Fig. 14. Dependence of the biofiltration effectiveness of trietyloamine vs the loading of the EKOSORB-100 bed at the wetting level $S = 0.316$ [kg water/kg commercial EKOSORB], for given contact time in the concentration range at the column inlet equal to $C_1 = 0.2 \div 107$ mg/m^3



Rys. 15. Zależność skuteczności biofiltracji trietyloaminy od jej stężenia na wlocie do kolumny ze złożem EKOSORB-100 przy poszczególnych czasach kontaktu

Fig. 15. Dependence of the biofiltration effectiveness of triethylamine vs its concentration in the column inlet for the EKOSORB-100 bed at particular contact times

7. Analiza wyników badań i wnioski

Przebiegi charakterystyk hydraulicznych dla złoża handlowego EKO-SORB-100 i złóż o różnym stopniu nawilżenia wskazują istotny wpływ S na opory przepływu. Stąd pojawia się problem, jakich należy użyć nawilżeń, aby złożo zbyt szybko nie wysychało, kiedy to proces biofiltracji mógłby ulec zahamowaniu. Analiza charakterystyk hydraulicznych (rys. 6) wskazuje, że dodatek około 2 dm^3 do złoża w kolumnie o średnicy $D_w = 0,175 \text{ m}$ i wysokości $H = 0,42 \text{ m}$ (co odpowiada nawilżeniu około $0,316 \text{ [kg H}_2\text{O/kg złoża handlowego]}$) powoduje niewielki wzrost oporów przy relatywnie dużym ładunku wilgoci, a więc zachowaniu funkcji złoża w procesie biofiltracji. Opis hydrauliki złóż o różnym stopniu nawilżenia, a zwłaszcza porównanie d_e , oraz uzyskane na podstawie d_e i ε wartości Re wskazują, że użyty w badaniach zakres w odpowiada przepływowi przejściowemu.

Najlepszą zgodność danych doświadczalnych z odpowiednim ujęciem teoretycznym daje zależność Leva'y (1), nieco gorszą – ujęcie oporów w oparciu o przepuszczalność $B_{0\text{sr}}$ z poprawką ΔB_0 . Użycie w obliczeniach ΔP przepuszczalności średniej i zależności Windspergera (10) powoduje wyraźne odstępstwa $(\Delta P)_{obl}$ od $(\Delta P)_{zm}$, zwłaszcza na skraju zmienności w użytego w badaniach. Można sądzić, że przyczyną tego jest pominięcie jakiegoś wpływu, który we wzorze (1) ujęty jest w doświadczalnym współczynniku α , a w zależności (9) – w przepuszczalności B_0 (ściślej: w poprawce ΔB wg (17)). Zatem zalecaną zależnością, służącą do obliczania oporów przepływu złoża EKOSORB-100 jest wzór Leva'y (1), dający dobrą zgodność danych zmierzonych z obliczonymi w zakresie nawilżeń złoża handlowego $S = 0 \div 1,265 \text{ [kg H}_2\text{O/kg złoża handlowego]}$. W przypadku innego S w tym zakresie w , niż użytego w badaniach, α można interpolować z rys. 11. Interesujące informacje uzyskuje się z analizy rysunków 8, 9 i 10. O ile zmniejszenie porowatości ε i przepuszczalności średniej $B_{0\text{sr}}$ ze wzrostem nawilżenia S jest zrozumiałe, to wyjaśnienia wymaga silny wzrost d_e . Otóż złożo handlowe EKOSORB-100 ma postać drobnych granulek. Dodatek wody powoduje ich pęcznienie, a co za tym idzie, nie tylko zmniejszenie porów, ale też zwiększenie tych granulek. Należy jednak zaznaczyć, że wprowadzone tu pojęcie d_e ma znaczenie umowne, wynikające z obliczeń tego parametru złóż ze wzoru Windspergera. Jak wspomniano wcześniej, poprawną wartość d_e uzyskuje się metodą izoterm adsorpcji, która może być jednak użyta tylko dla złóż suchych, a złóż takich nie stosuje się w procesach biofiltracji.

Na podstawie przeprowadzonych badań i ich opracowania możliwe stało się zestawienie niektórych własności hydrauliki złoża handlowego i złoża EKOSORB-100 nawilżonych. Zestawienie to znajduje się w tabeli 2.

Średnią powierzchnię rozwiniętą a obliczano zgodnie z [16] jako

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_e} \quad (27)$$

W przypadku innego S , niż podczas badań, odpowiednie wartości można interpolować z rys. 8÷11.

Badania biodegradacyjne prowadzono tylko dla jednego stopnia nawilżenia złoża, równego 0,316 kg H₂O/kg złoża handlowego. Stwierdzono, że zależności szybkości biodegradacji od obciążenia złoża i szybkości biodegradacji od koncentracji wlotowej aminy są liniowe, co oznacza, że w zakresie użytych stężeń wlotowych (0,2÷107 mg/m³) kinetyka biodegradacji odpowiada liniowemu odcinkowi prawa Michaelis-Menten i dotyczy wartości odorowych w powietrzu (tzn. niskich stężeń, gdy nie następuje tzw. „przebiecie” złoża). Wykazano również, że kilkunastotygodniowa eksploatacja w systemie periodycznym nie powodowała zmniejszenia jego aktywności biologicznej.

Skuteczność procesu zbliżoną lub równą 100% uzyskano dla stężeń w zakresie około 1,5÷97,8 mg/m³ dla $\dot{V} \approx 7$ nm³/h, 1÷98,7 mg/m³ dla $\dot{V} \approx 5$ nm³/h i 2,5÷107 mg/m³ dla $\dot{V} \approx 7$ nm³/h. Dla bardzo niskich stężeń wlotowych (około 0,2÷1,5 g/nm³) skuteczność była nieco mniejsza. Można sądzić, że spowodowane to było „wpracowywaniem się” złoża do podawanego odorantu i w wypadku ciągłej pracy kolumny uzyskanoby pełną degradację aminy.

Stwierdzono więc na podstawie przeprowadzonych badań, że EKOSORB-100 zachowuje się podobnie, jak złoża przebadane w [9÷14], tzn. można takie złożo użyć w procesie biofiltracji trietyloaminy, natomiast zaletą stosowania nawilżonego EKOSORBU-100 w stosunku do innych złożów jest możliwość podawania do kolumny biofiltracyjnej powietrza o wilgotności odpowiadającej wilgotności w otoczeniu. Informacją jakościową o konieczności ponownego nawilżenia złoża mógłby być wówczas pomiar spadku ciśnienia na złożu. Gdyby opory przepływu przez złożo znacząco się zmniejszyły, oznaczałoby to, że złożo należy nawilżyć.

8. Wnioski

Właściwości złoża modyfikowanego EKOSORB-100 wskazują, że jest ono atrakcyjne w procesie biofiltracji trietyloaminy występującej w powietrzu w niewielkich stężeniach (do 100 mg/nm^3). Dla stosowanych w praktyce przemysłowej liniowych prędkości przepływu gazów przez złożo w zakresie $0,04 \div 0,081 \text{ m/s}$ można wówczas oczekiwać pełnej degradacji aminy przy czasach kontaktu rzędu $5 \div 10 \text{ s}$. Najwyższe uzyskane w badaniach szybkości biofiltracji wynosiły około $19,3 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{s}$, a wynikają one ze stosowanych stężeń odorantu. Badania biofiltracyjne dotyczyły jednego stopnia nawilżenia złoża, równego $0,316 \text{ kgH}_2\text{O/kg}$ złoża handlowego. Do opisu oporów przepływu dobrze nadaje się prosta zależność (1). Zbliżone rezultaty uzyskuje się przy użyciu przepuszczalności średniej z poprawką. Zależność Windspergera daje różnice $(\Delta P)_{obl}$ i $(\Delta P)_{zm}$ na skraju przedziału zmienności w użytego w badaniach hydrauliki. Orientacyjne właściwości hydrauliczne złoża EKOSORB-100, zestawione w tabeli 2, wskazują na istotną zależność ε , $B_{0\text{sr}}$, d_e , a i α od stopnia nawilżenia złożeń oraz na fakt, że zakres Re w badaniach odpowiadał przepływowi przejściowemu.

Spis oznaczeń

a	- jednostkowa powierzchnia rozwinięta złoża, m^2/m^3
a	- specific surface area of the packing, m^2/m^3
a	- stała w zależności (17), m/s
a	- constant in Eq.(17), m/s
b	- stała w zależności (17), m^2
b	- constant in Eq.(17), m^2
d_e	- średnica ekwiwalentna, m
d_e	- equivalent diameter, m
k	- stała określana wg (5)
k	- constant determined due to (5)
p_{pr}	- ciśnienie próżni, Pa
p_{pr}	- vacuum pressure, Pa
B_0	- przepuszczalność złoża, m^2
B_0	- permeability of the bed, m^2
$B_{0\text{sr}}$	- przepuszczalność średnia złoża, m^2
$B_{0\text{sr}}$	- average permeability of the bed, m^2
ΔB_0	- poprawka obliczona zależnościami (17), m^2
ΔB_0	- correction factor due to (17), m^2
C_1	- koncentracja trietyloaminy na wlocie do kolumny, mg/m^3
C_1	- concentration of triethylamine in the column inlet, mg/m^3
C_2	- koncentracja trietyloaminy na wylocie z kolumny, mg/m^3
C_2	- concentration of triethylamine in the column outlet, mg/m^3
F	- przekrój poprzeczny kolumny, m^2

F	- column cross-section area, m^2
H	- wysokość czynna złoża w kolumnie, m
H	- active height of the bed, m
\dot{O}	- obciążenia złoża, $mg/m^3 \cdot s$
\dot{O}	- bed loading, $mg/m^3 \cdot s$
ΔP	- opory przepływu przez złożo, Pa
ΔP	- pressure drop across the bed, Pa
Re	- liczba Reynoldsa wg Windspergera [6]
Re	- Reynolds number due to Windsperger [6]
S_0	- stała charakterystyczna dla złoża obliczona wg [5], m
S_0	- characteristic constant of the bed calculated due to [5], m
\dot{V}	- objętościowe natężenie przepływu gazu przez kolumnę, m^3/s
\dot{V}	- volume flow rate of gas in the column, m^3
\dot{V}_r	- szybkość biodegradacji trietyloaminy, $mg/m^3 \cdot s$
\dot{V}_r	- biodegradation rate of triethylamine, $mg/m^3 \cdot s$

Litery greckie

α	- stała w zależności (1), $1/m$
α	- constant in Eq.(1), $1/m$
β	- stała w zależności (1), m/s^2
β	- constant in Eq.(1), m/s^2
ε	- porowatość złoża, m^3/m^3
ε	- porosity of the bed, m^3/m^3
η	- dynamiczny współczynnik lepkości, $Pa \cdot s$
η	- dynamic viscosity, $Pa \cdot s$
η	- skuteczność biodegradacji
η	- biodegradation effectiveness
λ	- współczynnik oporów przepływu
λ	- drag coefficient
ξ	- współczynnik krętości porów
ξ	- tortuosity coefficient of pores
ρ	- gęstość gazu, kg/m^3
ρ	- gas density, kg/m^3
τ_k	- czas kontaktu, s
τ_k	- contact time, s

Literatura

1. **Palica M., Chmiel K., Waluś J.:** Hydraulika wybranych złóż biologicznie czynnych, Rocznik Ochrony Środowiska, Koszalin, Tom 1, 85 (1999)
2. **Hobler T.:** Dyfuzyjny ruch masy i absorber, WNT, Warszawa 1976
3. **Ergun S.:** Chem. Eng. Progr., 48, 89 (1952)
4. **Carman P.C.:** Flow of gases through porous media, Butterworths Sci Public., London 1956
5. **Palica M.:** Inż. Chem., 4, 757 (1973)
6. **Windsperger A.:** Chem. -Ing. -Techn., 63, 80 (1991)
7. **Kawalec-Pietrenko B., Ścisłowski M.:** Powierzchnia właściwa złóż stosowanych jako wypełnienia w biofiltrach do gazów, Inż. i Ap. Chem., 2, 3 (2000)
8. **Chmiel K., Kawik M., Palica M., Waluś J.:** Wyznaczanie porowatości złóż metodą próżniową, Ochr. Pow. i Probl. Odp., (przyjęto do druku)
9. **Palica M., Piotrowski K.:** Chem. i Inż. Ekol., 74, 5, 1 (1997)
10. **Kaczyńska T., Palica M., Tatoj P., Waluś J., Wilczek A.:** Ochr. Pow. i Probl. Odp., 1, 19 (1998)
11. **Kaczyńska T., Palica M., Tatoj P., Wilczek A.:** Ochr. Pow. i Probl. Odp., 1, 19 (1998)
12. **Palica M., Waluś J.:** Chem. Biochem. Engng Q., 12, 37 (1998)
13. **Palica M., Waluś J.:** Inż. Ap. Chem., 1, 8 (1998)
14. **Chmiel K., Kawik M., Palica M., Tatoj P., Waluś J.:** Zesz. Nauk. Pol. Koszalińskiej, Seria „Inż. Środ.”, 15, 293 (1999)
15. **Król S.:** Biodegradacja trietyloaminy przy użyciu złoża modyfikowanego EKO-SORB-100, Praca dypl. mag. wykonana pod kierunkiem M. Palicy, Inst. Inż. Chem. i Proc., Pol. Śl., Gliwice 1999 (praca do użytku wewnętrznego)
16. **Kawalec-Pietrenko B., Ścisłowski M.:** Inż. i Ap. Chem., 6, 8 (1999)

Hydraulics and Biofiltration of Triethylamine in the Modified EKOSORB-100 Bed

Abstract

The Author's own experimental results dealing with gas pressure drop in a modified supersorbent bed – EKOSORB 100 for different initial wetting are analysed in the paper. Moreover, the biodegradation kinetics of triethylamine in a form of the relationship of the biofiltration rate and process effectiveness as a function of the odour loading of the bed is described. Polymer beds are char-

acteristic of high water retention, therefore enabling one to decrease the wetting frequency in the case of feeding a biofiltration column with insufficiently moisturised gases. Also basic parameters of the commercial EKOSORB bed are given. In description of the commercial and differently wetted beds, one employed a concept of permeability, Lava's relationship and Windsperger's proposal. The last one treats jointly the drag coefficient and the pore tortuosity, at the range of wetting equal to $S = 0 \div 1.265$ kg H₂O/kg commercial EKOSORB. On the basis of Windsperger's approach, the range of the Re number (for the linear gas flow rate: $w=0.040 \div 0.081$ m/s), the equivalent diameter, specific interfacial area and bed permeability for different values of wetting were determined. It was stated that the increase of wetting resulted in the decrease of porosity and specific interfacial area, while the value of equivalent diameter was going up. Also the gas pressure drop was strongly increasing with a rise of the bed wetting. The hydraulics results were compared with the available literature data for various natural beds used in biofiltration. Specific pressure drop, $\frac{\Delta P}{\rho \cdot H}$,

for the velocity $w \approx 0.06$ m/s is equal to about 1250 m/s² and is close to values obtained for wheaten straw or processed material in mushroom production, but lower than that often used in biofiltration vegetable soil. The wetting level of the commercial bed assumed in biofiltration of triethylamine (0.316 kg H₂O/kg) resulted from a relatively low increase of the pressure drop in comparison with the commercial bed. The highest value of the biofiltration rate obtained during experiments was equal to about 19.3 mg/m³h and resulted from the odour concentration used. It was stated that in the tested range of inlet concentration (0.2÷107 mg/m³), biodegradation kinetics corresponded to a linear part of the Michaelis-Menten low. A full biodegradation effectiveness of triethylamine was obtained in the inlet concentration range equal to about 2.5÷107 mg/m³. For the lowest value of the inlet concentration used during experiments the effectiveness was slightly lower which was probably caused by „adjusting-in-processing” of the bed to particular odour. It was also proved that the exploitation of the EKOSORB-100 bed in a batch mode during dozen-or-so weeks did not cause the decrease of its biological activity. Therefore, it can be stated that the modified polymer EKOSORB-100 bed is eminently suitable for biofiltration of triethylamine.