

Grzegorz ŁAGÓD<sup>1</sup>, Henryk SOBCZUK<sup>1</sup> i Zbigniew SUCHORAB<sup>1</sup>

## BŁONA BIOLOGICZNA W KANALIZACJI GRAWITACYJNEJ I JEJ WPŁYW NA BIODEGRADACJĘ ŚCIEKÓW

### BIOFILM IN GRAVITATIONAL SEWER SYSTEM AND ITS INFLUENCE ON WASTEWATER BIODEGRADATION

**Abstrakt:** Warstwa błony biologicznej narastająca na ściankach przewodów kanalizacyjnych jest formacją pospolicie występującą w środowisku naturalnym, powstaje ona jako wynik naturalnej akumulacji mikroorganizmów na powierzchni ciała stałego. Przykładem może być chociażby pekton pokrywający przedmioty zanurzone w wodzie rzecznej czy też biofilm porastający zanurzone w ściekach części urządzeń biologicznej oczyszczalni ścieków. Jednakże proporcje udziału poszczególnych gatunków w składzie biofilmu kanalizacyjnego są inne niż w oczyszczalniach czy rzekach ze względu na różne warunki środowiskowe. W systemach kanalizacyjnych świeże ścieki charakteryzują się dużą koncentracją zanieczyszczeń w postaci związków organicznych o różnorodnych właściwościach oraz rozmiarach cząstek. Tworzy to środowisko życia mikroorganizmów bogate w składniki odżywcze, dostępne zarówno dla błony biologicznej, jak i biomasy zawieszanej. Błona biologiczna posiada silnie heterogenną strukturę jakościowo-przestrzenną z licznymi zagłębieniami i porami wypełnionymi cieczą bądź gazem w zależności od aktualnych warunków środowiskowych. Można więc stwierdzić, że jest mocno zróżnicowanym systemem, odgrywającym znaczącą rolę w procesach biodegradacji ścieków w kanalizacji grawitacyjnej. Korzystając z badań terenowych oraz literaturowych, autorzy zaprezentują najważniejsze właściwości biofilmu kanalizacyjnego oraz jego wpływ na biodegradację ścieków.

**Słowa kluczowe:** błona biologiczna, kanalizacja grawitacyjna, biodegradacja ścieków w kanalizacji

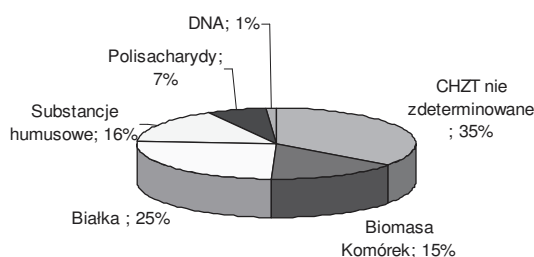
Warstwa błony biologicznej narastająca na ściankach przewodów kanalizacyjnych jest formacją pospolicie występującą w środowisku naturalnym, powstaje ona jako wynik naturalnej akumulacji mikroorganizmów na powierzchni ciała stałego [1, 2]. Przykładem może być chociażby pekton pokrywający przedmioty zanurzone w wodzie rzecznej czy też biofilm porastający zanurzone w ściekach części urządzeń biologicznej oczyszczalni ścieków [2-6]. Jednakże proporcje udziału poszczególnych gatunków w składzie biofilmu kanalizacyjnego są inne niż w oczyszczalniach czy rzekach ze względu na różne warunki środowiskowe. W systemach kanalizacyjnych świeże ścieki charakteryzują się dużą koncentracją zanieczyszczeń w postaci związków organicznych o różnorodnych właściwościach oraz rozmiarach cząstek. Tworzy to środowisko życia mikroorganizmów bogate w składniki odżywcze, dostępne zarówno dla błony biologicznej, jak i biomasy zawieszanej.

W kolektorach kanalizacyjnych biofilm zawiera oprócz mikroorganizmów oraz produkowanych przez nie egzopolisacharydów również inne związki organiczne [1, 7] i materiały nieorganiczne - piasek, zeolity itd. (rys. 1). W kanalizacji bytują oprócz bakterii także organizmy eukariotyczne, które odgrywają znaczącą rolę w kształtowaniu właściwości błony biologicznej [2, 3].

Mikroorganizmy wytwarzają pozakomórkowe związki organiczne, które umożliwiają im osiadły tryb życia. Bogata w śluz powierzchnia biofilmu chroni bytujące w nim i tworzące go organizmy przed wymywaniem przez przepływające ścieki. Chroni je także

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 081 538 43 22, email: G.Lagod@wis.pol.lublin.pl

przed nagłymi zmianami warunków środowiskowych, jak chociażby wysychaniem spowodowanym spadkiem poziomu ścieków, niektórymi związkami chemicznymi, a nawet bakteriofagami [2, 9-12]. Obecność błony biologicznej znacznie wydłuża średni czas przetrzymania mikroorganizmów biomasy heterotroficznej w kanalizacji. Umożliwia to bakteriom charakteryzującym się wolniejszym wzrostem - redukującym siarkę czy przeprowadzającym metanogenezę - wykształcenie znaczących liczebnie populacji [1, 2].



Rys. 1. Typowa kompozycja błony biologicznej w systemie kanalizacyjnym [2, 8]

Fig. 1. Typical composition of biofilm in sewer system [2, 8]

Populacje bakterii bytujące w systemie kanalizacyjnym cechują się zdolnością do produkcji wewnątrzkomórkowych materiałów zapasowych - takich jak na przykład glikogen, co znacznie minimalizuje skutki występujących nierównomierności w dostępie do składników pokarmowych. Ma to szczególne znaczenie w przewodach kanalizacyjnych o mniejszych średnicach oraz większej nierównomierności przepływu.

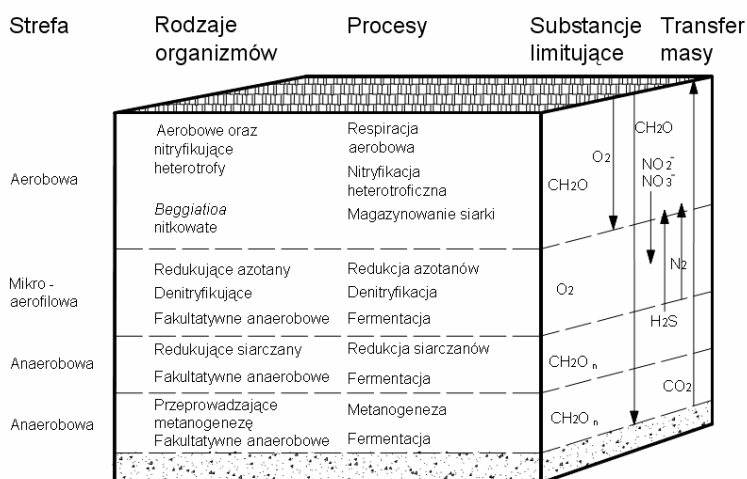
### Struktura błony biologicznej

W pełni ukształtowana błona biologiczna ma charakterystyczne warstwy [2, 13]. Warunkowane są one ilością tlenu docierającego do kolejnych, położonych coraz głębiej stref. Gradient przestrzenny natlenienia powoduje różnice zarówno we właściwościach struktury, składu, jak i prędkości transformacji związków chemicznych wewnątrz biofilmu. Silnie obciążona błona biologiczna zawiera w swoim składzie - w poszczególnych warstwach większość grup funkcjonalnych organizmów powodujących biodegradację zanieczyszczeń.

Rozmieszczenie przestrzenne różnych grup organizmów wpływa na aktywność biologiczną błony w różnych jej obszarach (rys. 2). Z badań wynika, iż bakterie heterotroficzne z reguły przewyższają liczebnie autotroficzne. Przestrzenne rozmieszczenie heterotrofów w błonie jest niemal jednolite, chociaż bakterie - fakultatywne anaeroby wzrastają liczebnie z poziomu  $10^7 \div 10^8$  w głębszych warstwach do poziomu  $10^9 \div 10^{10}$  LJK  $\text{cm}^{-3}$  w warstwie powierzchniowej. Populacja bakterii nityfikujących utrzymuje się w biofilmie kanalizacyjnym na poziomie  $10^4 \div 10^6$  NPL  $\text{cm}^{-3}$ . Chociaż wszystkie żywe bakterie warstwy powierzchniowej mogą być aktywne metabolicznie, to jednak w warunkach rzeczywistych tylko około 25% z nich pozostaje aktywna, reszta zaś to komórki w stanie spoczynku. Ponadto 65% całkowitej masy zawartej w kanalizacyjnej błonie biologicznej stanowi masę inertną dla przemian biochemicznych [2, 9].

Gęstość błony biologicznej wzrasta wraz z odległością od powierzchni, z 14 w strefie powierzchniowej do  $97 \text{ kg } Z_{og} \text{ m}^{-3}$  w warstwie położonej najgłębiej ( $Z_{og}$  - zawiesina ogólna). Badania wykazują, że następuje również zmiana porowatości (dla warstw grubszych od  $500 \mu\text{m}$ ) z  $83\div 90\%$  dla warstw powierzchniowych do  $67\div 64\%$  dla warstw najgłębszych. Gęstość błony biologicznej jest także zróżnicowana w zależności od wysokości ulokowania na obwodzie zwilżonym i wzrasta wraz z głębokością - od zwierciadła ścieków do dna.

Rozmieszczenie przestrzenne mikroorganizmów prokariotycznych jest różnicowane także szybkością ich wzrostu, gdyż szybciej przyrastające zgrupowania zwykle obrastają te przyrastające wolniej. Stąd też mikroorganizmy o większym tempie przyrostu akumulują się bliżej powierzchni błony biologicznej. W zależności od ilości dostępnych substratów mikroorganizmy w głębi biofilmu rozwijają się z różną szybkością. Ponadto organizmy prokariotyczne błony biologicznej stale są wyżerane przez organizmy eukariotyczne.



Rys. 2. Procesy w błonie biologicznej w zależności od głębokości oraz stref dostępności tlenu i substratów [2]

Fig. 2. The biofilm zones and processes in dependence to oxygen and substrates availability [2]

Błona biologiczna porasta ścianki przewodów kanalizacyjnych nie tylko poniżej poziomu ścieków, ale także powyżej tego poziomu. Ma to związek zarówno z częstymi wahaniami poziomu ścieków w kanalizacji grawitacyjnej, jak i faktem, iż składniki odżywcze mogą być pobierane również ze stale wilgotnego powietrza, a także aerozoli. Jest to szczególnie widoczne w miejscach o burzliwym przepływie - studzienkach kaskadowych lub innych urządzeniach wzmagających produkcję aerozoli. Jednakże biofilm narosły powyżej zwierciadła ścieków cechuje się zauważalnie mniejszą aktywnością tlenową niż rozwijający się poniżej. Powodowane jest to zwiększonym udziałem tłuszczów w jego całkowitej masie, co oprócz mniejszej aktywności oddechowej powoduje również zwiększoną odporność na erozję tej części biofilmu [2].

Błona biologiczna porastająca ścianki kolektorów kanalizacji grawitacyjnej ma z reguły od kilku do kilkunastu milimetrów grubości. Jej grubość zmienia się i jest najmniejsza przy dużej prędkości przepływu ścieków. Ma także wyraźne włókniste

struktury, znacznie usprawniające pobieranie tlenu, co powoduje, iż zużycie tlenu jest w niewielkim stopniu uzależnione od jego stężenia w ściekach [14, 15]. Powierzchnia błony charakteryzująca się silnie nieregularną topografią ma liczne makropory, nazywane „kanałami wodnymi”, oddzielone od siebie biomasą mikroorganizmów kolonijnych [13, 16]. Makropory ułatwiają transfer masy poprzez biofilm, wpływając tym samym na efektywność dyfuzyjną.

Dokładne opracowania, w których opisano w trzech wymiarach procesy transportu masy i wzrostu błony biologicznej, nie są w bezpośredni sposób wykorzystywane w modelu biodegradacji ścieków w kanalizacji. Spowodowane jest to faktem, że odwzorowanie obiektów w skali technicznej za pomocą złożonego opisu matematycznego, wymagającego określenia całego szeregu parametrów wejściowych i warunków brzegowych oraz kosztownych pomiarów kalibracyjnych, nie umożliwia uzyskania wyników o większej dokładności niż otrzymywane z modeli uproszczonych [13]. Dąży się zatem do opisu wymagającego minimalnej liczby danych, oferującego jednocześnie zadowalający poziom dokładności uzyskiwanych wyników [1, 2, 11, 16].

### **Równowaga dynamiczna grubości błony biologicznej**

Grubość błony biologicznej zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to przyrost biomasy aktywnych komórek, akumulacja polimerów zewnątrzkomórkowych oraz materiałów inertnych powstałych z rozpadu biomasy, a także depozycja cząstek, pochodzących z przepływających ścieków. Ubytek biomasy mikroorganizmów może następować na skutek wyżerania przez organizmy eukariotyczne i prokariotyczne oraz na skutek aktywności bakteriofagów [2]. Erozja powodowana hydrodynamicznymi efektami przepływu ścieków prowadzi do stopniowej, lecz ciągłej utraty masy z błony biologicznej. Abrazja i ewersja powodują podobne skutki. Gdy pewna graniczna wartość grubości zostanie przekroczona, ścinanie powoduje okresowe odrywanie większych części błony biologicznej i przemieszczenie jej w strumieniu ścieków, gdzie zaczyna pełnić funkcję biomasy zawieszanej. Proces ten może być wspomagany przez przemiany wewnątrz błony, w wyniku których mogą maleć siły ją wiążące poprzez produkcję substratów lub gazów rozrywających biofilm od wewnątrz [2].

Wszystkie wspomniane powyżej procesy, podobnie jak przypadki katastrofalne (nagły, nietypowy przepływ o dużej prędkości lub zrzut substancji trujących), prowadzą do ubytku aktywnej biomasy z błony biologicznej. Zanik błony następuje także w wyniku zamierania biomasy na przykład na skutek niedostatku substancji pokarmowych. W efekcie tych przemian biodegradowalne substancje zgromadzone w błonie biologicznej są przekształcane w substrat rozpuszczony przez egzoenzymy. Substraty rozpuszczone mogą być wykorzystywane na potrzeby organizmów biofilmu bądź też dyfundują na zewnątrz błony do strumienia przepływających ścieków.

Jak wykazują badania [14], rozmiary błony biologicznej w kanalizacji - zarówno jej powierzchnia, jak i grubość - bardziej zależą od warunków hydrodynamicznych w przewodach niż od prędkości przyrostu biomasy. Warunki hydrodynamiczne cechują się dużą zmiennością zarówno w czasie, jak i na długości przewodu kanalizacyjnego. Ponadto przepływające ścieki generują naprężenia ścinające o różnej wartości w różnych punktach przekroju czynnego - największe w pobliżu dna, a najmniejsze przy ściankach w pobliżu swobodnego zwierciadła ścieków. Ważne z punktu widzenia usuwania biomasy ze ścianek

są wspomniane uprzednio siły abrazyj powodowane transportem ciał stałych. Zwiększenie odporności biofilmu na wymywanie może być powodowane osadzaniem się tłuszczów na ściankach w pobliżu swobodnego zwierciadła ścieków [2, 9, 10, 15, 17, 18].

Można więc mówić o znacznym wpływie prędkości przepływu oraz naprężeń ścinających na strukturę i właściwości biofilmu [15]. Potwierdzono to na podstawie badań laboratoryjnych przy dużych naprężeniach ścinających, gdzie wyerodowana część błony biologicznej spowodowała biodegradację większości dostępnego ChZT (nawet 80÷90%) [14]. Nawet do 90% całkowitej ilości biomasy wyerodowanej przy danym naprężeniu ścinającym jest oderwane od powierzchni w ciągu pierwszych 1÷2 minut działania naprężenia [2]. Zauważono także, iż oddzielanie się fragmentów biofilmu zanika po wstrzymaniu dopływu substratów pokarmowych [2, 19]. Zaobserwowano ponadto, iż błona biologiczna narosła przy małych naprężeniach ścinających przy wzroście tych naprężeń eroduje znacznie szybciej niż podobna, która narastała przy dużych naprężeniach ścinających. Największą akumulację masy błony biologicznej można osiągnąć przy naprężeniach ścinających rzędu  $1,5 \text{ N m}^{-2}$ . Tak więc gwałtowne zmiany prędkości przepływu ścieków wpływają na zjawisko transportu masy oraz grubość błony biologicznej, gdy zmiany o takiej samej amplitudzie, lecz długoterminowe powodują zmiany w strukturze biomasy.

### Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej powyżej analizy doniesień literaturowych można wysnuć następujące wnioski dotyczące składu, budowy oraz zachowania błony biologicznej, przy zmiennym obciążeniu substratem oraz zmiennych naprężeniach ścinających:

- W pełni wykształcony, starszy biofilm (powyżej 12 d) jest bardziej odporny na erozję niż młodszy.
- Ilość biomasy erodującej z błony biologicznej zależy od wartości naprężeń ścinających.
- Ilość biomasy usuniętej z błony biologicznej podczas wzrastających naprężeń ścinających zależy od warunków, w jakich błona narastała - większe naprężenia podczas wzrostu warunkują powstanie biofilmu bardziej stabilnego i odpornego na ścinanie.
- Większe naprężenia ścinające podczas wzrostu błony biologicznej powodują jej nierównomierny rozwój w przestrzeni.
- Biofilm kanalizacyjny jest mocno zróżnicowanym systemem, odgrywającym znaczącą rolę w procesach biodegradacji ścieków w kanalizacji grawitacyjnej, zaś procesy w nim zachodzące nie są jednak jeszcze dostatecznie dobrze poznane i opisane.

### Literatura

- [1] Bishop P.L.: *Biofilm structure and kinetics*. Water Sci. Technol., 1997, **36**(1), 287-294.
- [2] Huisman J.L.: *Transport and transformation process in combined sewers*. IHW Schriftenreihe, 2001, **10**, 1-180.
- [3] Łagód G., Malicki J., Montusiewicz A. i Chomczyńska M.: *Wykorzystanie mikrofauny saprobiontów do bioindykacji jakości ścieków w systemach kanalizacyjnych*. Arch. Environ. Protect., 2004, **30**(3), 3-12.

- [4] Łagód G., Sobczuk H. i Suchorab Z.: *Modelowanie procesów samooczyszczania ścieków*. II Kongres Inżynierii Środowiska. Materiały, tom 1. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 2005, **32**, 825-833.
- [5] Łagód G. i Sobczuk H.: *Transformation and biodegradation of pollutants in sewer systems as a processes leading to sewage self-purification*. Ecol. Chem. Eng., 2006, **13**(3-4), 247-254.
- [6] Łagód G., Malicki J., Chomczyńska M. i Montusiewicz A.: *Interpretation of the results of wastewater quality biomonitoring using saprobes*. Environ. Eng. Sci., 2007, **24**(7), 873-879.
- [7] Raunkjær K., Hvitved-Jacobsen T. i Nielsen P.H.: *Transformation of organic matter in a gravity sewer*. Water Environ. Res., 1995, **67**(2), 181-188.
- [8] Hvitved-Jacobsen T.: *SEWER PROCESSES Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks*. CRC PRESS, Boca Raton, London, New York, Washington 2002.
- [9] Bishop P.L., Tian C.Z. i Yun-Chang F.: *Effects of biofilm structure, microbial distributions and mass transport on biodegradation processes*. Water Sci. Technol., 1995, **31**(1), 143-152.
- [10] Æsoy A., Storfjell M., Mellgren L., Helness H., Thorvaldsen G., Odegaard H. i Bentzen G.: *A comparison of biofilm growth and water quality changes in sewers with anoxic and anaerobic (septic) conditions*. Water Sci. Technol., 1997, **36**(1), 303-310.
- [11] Hermanowicz S.W.: *Two-dimensional simulations of biofilm development: effects of external environmental conditions*. Water Sci. Technol., 1999, **39**(7), 107-114.
- [12] Lewandowski Z., Webb D., Hamilton M. i Harbin G.: *Quantifying biofilm structure*. Water Sci. Technol., 1999, **39**(7), 71-76.
- [13] Beyenal H. i Lewandowski Z.: *Modeling mass transport and microbial activity in stratified biofilm*. Chem. Eng. Sci., 2005, **60**, 4337-4348.
- [14] Norsker N.H., Nielsen P.H. i Hvitved-Jacobsen T.: *Influence of oxygen on biofilm growth and potential sulfate reduction in gravity sewer biofilm*. Water Sci. Technol., 1995, **31**(7), 159-167.
- [15] Wilderer P.A., Cunningham A. i Schnidler U.: *Hydrodynamic and shear stress: report from the discussion session*. Water Sci. Technol., 1995, **32**(8), 271-271.
- [16] DeBeer D., Stoodley P. i Lewandowski Z.: *Liquid flow and mass transport in heterogeneous biofilms*. Water Res., 1996, **30**(11), 2761-2765.
- [17] Ahyerre M., Chebbo G. i Saad M.: *Sources and erosion of organic solids in a combined sewer*. Urban Water, 2000, **2**, 305-315.
- [18] Banasiak R., Verhoeven R., De Suttera R. i Tait S.: *The erosion behavior of biologically active sewer sediment deposits: Observations from a laboratory study*. Water Res., 2005, **39**, 5221-5231.
- [19] Tjihuis L., Hijman B., van Loosdrecht M.C.M. i Heijnen J.J.: *Influence of detachment, substrate loading and reactor scale on the formation of biofilms in airlift reactors*. Appl. Microbiol. Biotechnol., 1996, **45**(1-2), 7-17.

## BIOFILM IN GRAVITATIONAL SEWER SYSTEM AND ITS INFLUENCE ON WASTEWATER BIODEGRADATION

**Abstract:** The biofilm layer developing on the walls of sewer pipes is a common formation in the natural environment. The biofilm can be defined as a natural accumulation of microorganisms on the solid body surface, like the pecton covering the surface of solid in the river water or the devices of the biological sewage treatment plant. The proportions of particular species in biofilm composition are different in various WWTP or rivers due to the environmental condition influence. In the sanitation fresh sewage is characterized by high concentration of pollutants in a form of organic compounds with particles of various properties and dimensions. It forms the environment rich in nourishment substrates available both for the biofilm and the suspended biomass. The biofilm in sewers is spatially strongly heterogeneous. It consist of caverns, channels and pores filled with liquids or gases depending on actual environmental conditions. It can be said that it is potently diversified system, important in the biodegradation of sewage in gravitational sewerage. Basing on the field and the literature examinations the authors have presented the most important sewer biofilm parameters and their influence on the sewage biodegradation.

**Keywords:** biofilm, gravitational sewer systems, sewage biodegradation in sewer conduits