

Wpływ zwilżalności powierzchni kompozytów polimerowo-drzewnych na tworzenie biofilmu w procesach oczyszczania ścieków

Izabela Kuszelnicka^{1), *)}, Anna Rudawska²⁾, Dobrochna Ginter-Kramarczyk¹⁾, Michał Michałkiewicz¹⁾, Stanisław Zajchowski³⁾, Jolanta Tomaszewska³⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.9.6

Streszczenie: Materiały kompozytowe mogą być z powodzeniem stosowane jako wypełnienie/nośnik w technologii oczyszczania ścieków z zastosowaniem złoża zawieszonoego MBBR (ang. *moving bed biofilm reactor*). Właściwościami decydującymi o możliwości ich wykorzystania w procesach oczyszczania ścieków są chropowatość i stopień zwilżalności powierzchni, mające bezpośredni wpływ na stopień absorpcji i agregacji na niej mikroorganizmów, co jest związane z właściwościami hydrofilowymi lub hydrofobowymi materiału. Zbadano podatność powierzchni kształtek wykonanych z kompozytów polimerowo-drzewnych (WPC) na tworzenie biofilmu w procesie oczyszczania ścieków. Stwierdzono bezpośredni wpływ składu WPC i czasu jego przebywania w bioreaktorze na wartość kąta zwilżania. Wielkość zmiany wartości kąta zwilżania charakteryzuje zdolność materiałów polimerowo-drzewnych do tworzenia się na nich biofilmu.

Słowa kluczowe: technologia złoża ruchomego, MBBR, kompozyty polimerowo-drzewne, technologie oczyszczania ścieków, zwilżalność.

Effect of surface wettability of wood-polymer composites on biofilm formation in wastewater treatment processes

Abstract: Composite materials, due to their properties, can be used as filling/carrier in the technology of wastewater treatment using a moving bed biofilm reactor (MBBR). The surface roughness and wettability, which are related to the material hydrophobic or hydrophilic properties and directly influence the degree of absorption and aggregation of microorganisms, are crucial from the point of view of application in the wastewater treatment processes. In this work, the susceptibility of the surface of specimens made from the wood-polymer composites (WPC) to biofilm formation in the wastewater treatment process was investigated. The study showed that the composition of WPC and its residence time in the bioreactor have a direct influence on the contact angle. The change in contact angle value determines the ability of biofilm formation on wood-polymer materials.

Keywords: moving bed technology, MBBR, wood-polymer composites, wastewater treatment technologies, wettability.

Materiały kompozytowe ze względu na swoje właściwości z powodzeniem mogą być stosowane jako wypełnienie (nośnik) w technologii oczyszczania ścieków

¹⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań.

²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin.

³⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zakład Technologii Polimerów i Powłok Ochronnych, ul. Seminaryjna 3, 85-326 Bydgoszcz.

*) Autor do korespondencji:

e-mail: izabela.kruszelnicka@put.poznan.pl

z zastosowaniem złoża ruchomego MBBR (ang. *moving bed biofilm reactor*). Oczyszczanie ścieków w reaktorach z ruchomym złożem zawieszonym jest warunkowane procesami biologicznego rozkładu materii organicznej przez drobnoustroje, które tworzą na powierzchni złoża błonę biologiczną, tak zwany biofilm [1–3]. Elementy biologicznego złoża ruchomego najczęściej są wykonane z polietylenu lub polipropylenu. Równie interesującym materiałem do wykorzystania w technologii oczyszczania ścieków są kompozyty polimerowo-drzewne (WPC) (ang. *wood-polymer composites*) [4, 5].

Właściwości fizyczne WPC zależą m.in. od rodzaju i zawartości napełniacza oraz sposobu jego rozłożenia w osnowie, a także – w wypadku napełniaczy włóknistych – od orientacji włókien. Powierzchnię materiału

charakteryzuje m.in. struktura geometryczna oraz właściwości energetyczne, takie jak np. zwilżalność i właściwości adhezyjne, określone przez wartość swobodnej energii powierzchniowej. Cechy te wpływają na stopień adsorpcji i agregacji mikroorganizmów na powierzchni kompozytu.

Analiza procesów zachodzących na powierzchni ruchomego złoża biologicznego powinna uwzględniać zjawisko zwilżania powierzchni materiału tego złoża przez inne substancje lub materię biologiczną. Zwilżalność (określona wartością kąta zwilżania) jest także związana ze swobodną energią powierzchniową, od której zależy m.in. szybkość i stopień agregacji drobnoustrojów oraz hydrofilowość lub hydrofobowość nośników [5].

ZWILŻALNOŚĆ

Zwilżalność to cecha fizyczna powierzchni materiałów określająca ich oddziaływanie z cieczami, głównie z wodą, determinująca podstawowe właściwości materiałów, np. adhezję [6, 7].

Miarą zwilżalności powierzchni jest kąt zwilżania θ (nazywany także kątem przylegania lub kątem granicznym), utworzony między zwilżaną powierzchnią ciała stałego a styczną do powierzchni cieczy zwilżającej (krzywizny menisku cieczy zwilżającej), wyprowadzoną z punktu zetknięcia cieczy z powierzchnią ciała stałego (rys. 1) [8–10].

Wartość kąta θ mniejsza niż 90° świadczy o zjawisku zwilżania powierzchni ciała stałego. Gdy kąt zwilżania $\theta = 0^\circ$, wówczas ciecz rozplywa się idealnie po powierzchni ciała stałego i następuje jego całkowite (pełne) zwilżenie (rys. 2A). W takim wypadku powierzchnię określa

się jako idealnie hydrofilową. Wartość kąta $\theta = 180^\circ$ dowodzi absolutnej niezwilżalności powierzchni (rys. 2D) [12, 13]. Ciała niezwilżalne przez wodę określa się jako hydrofobowe.

Do wyznaczenia wartości kąta zwilżania stosuje się wiele metod [14–18] m.in.:

- metodę pęcherzyka powietrza,
- metodę geometryczną,
- metodę wzrostu kapilarnego cieczy na próbce badanego tworzywa (m.in. metoda Wilhelmy'ego),
- metodę bezpośredniego pomiaru kąta zwilżania.

Obecnie powszechnie stosowany jest bezpośredni pomiar za pomocą specjalnych urządzeń zwanych gonioimetrami lub analizatorami kąta zwilżania. W metodzie tej ważne jest uwzględnienie wielu czynników gwarantujących poprawność wykonania pomiarów.

WPLYW WŁAŚCIWOŚCI POWIERZCHNI MATERIAŁU NA TWORZENIE BIOFILMU

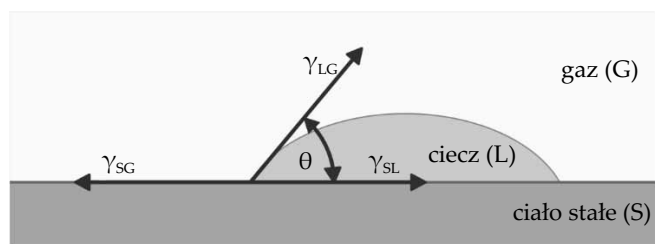
Podstawowe cechy powierzchni materiałów polimerowych określają właściwości jej warstwy wierzchniej. Warstwa wierzchnia charakteryzuje się odmienną strukturą niż rdzeń materiału i, poddawana działaniu różnych czynników zależnych od przeznaczenia i warunków eksploatacji wyrobu, spełnia liczne różne funkcje. W wypadku wykorzystania materiałów polimerowych jako nośników w technologii złoża ruchomego, unieruchomienie mikroorganizmów jest możliwe wówczas, gdy komórki drobnoustrojów wykazują zdolność do osadzenia się bądź przylegania do powierzchni nośnika. Podstawą tego zjawiska jest wzajemne oddziaływanie nośnika i komórki, obejmujące tworzenie wiązań wodorowych, jonowych i oddziaływań van der Waalsa.

Zastosowanie w charakterze nośnika kształtek z polimerowego kompozytu drzewnego pozwala na zagęszczenie populacji mikroorganizmów w bioreaktorze. Dzięki dobrze rozwiniętej powierzchni czynnej kompozytowego nośnika nie ma ponadto problemów z pęcznieniem osadu, zmniejsza się też wrażliwość populacji bytujących organizmów na niekorzystne warunki środowiskowe [19]. Celem przedstawionej pracy była ocena, na podstawie wyznaczonego kąta zwilżania, podatności powierzchni kształtek (wiosełek) wykonanych z polipropylenu (PP) oraz z kompozytów polimerowo-drzewnych na osnowie PP na tworzenie biofilmu w procesie oczyszczania ścieków. Artykuł stanowi dalszy ciąg badań dotyczących możliwości wykorzystania kompozytów polimerowo-drzewnych we wspomnianym procesie.

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

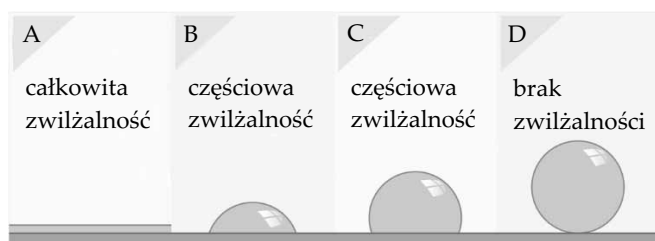
Materiały

Osnowę kompozytów polimerowo-drzewnych stanowił polipropylen (PP, Moplen HP648T) firmy Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o. W charakterze napełniaczy zasto-



Rys. 1. Zwilżalność powierzchni ciała stałego przez ciecz, przypadek dobrej zwilżalności, $\theta < 90^\circ$ [11]

Fig. 1. Wetting of a solid surface by a liquid in case of good wettability, $\theta < 90^\circ$ [11]



Rys. 2. Stopnie zwilżenia powierzchni przez kroplę cieczy [12, 13]

Fig. 2. Wetting degrees of the surface with a drop [12, 13]

sowano dwa rodzaje mączki drzewnej firmy J. Rettenmaier und Söhne GmbH + CoKG Niemcy, pochodzącej z drzew iglastych: Lignocel C 120 o wymiarach cząstek 70–150 μm oraz L9 o wymiarach cząstek 0,8–1,1 mm.

Przygotowanie próbek do badań

W wyniku homogenizacji przeprowadzonej metodą wytłaczania dwuślimakowego polipropylenu, kolejno, z dwoma rodzajami mączki drzewnej otrzymano kompozyty o składzie przedstawionym w tabeli 1. Kompozyty te po wytłoczeniu rozdrobiono. Wszystkie próbki do badań, zgodnie z normą PN-ISO 527-2 w postaci wiosełek typu 1A, wytwarzano z kompozytów oraz polipropylenu metodą wtryskiwania przy użyciu wtryskarki WH 80 Ap produkcji Metalchem Poznań. Temperatura stref grzejnych cylindra od zasobnika tworzywa wynosiła kolejno: 150, 180 i 180 $^{\circ}\text{C}$, prędkość obrotowa ślimaka 100 obr./min, czas wtrysku 3 s, czas docisku 7 s i czas chłodzenia 30 s. Temperatura dwugniazdowej formy wynosiła 20 $^{\circ}\text{C}$. Wytworzone kształtki umieszczano na 12 miesięcy w komorze napowietrzania bioreaktora (nityfikacji) o znanych parametrach technicznych w Centralnej Oczyszczalni Ścieków dla miasta Poznania w Koziegłowach. Średnio co dwa miesiące pobierano próbki do badań [19].

Z każdej partii materiału przed umieszczeniem w bioreaktorze pobierano 10 próbek stanowiących materiał referencyjny.

T a b e l a 1. Oznaczenie i skład badanych próbek

T a b l e 1. Symbols and compositions of studied specimens

Oznaczenie	Skład próbki
Materiał osnowy	100 % PP
Kompozyt 1	60 % PP/40 % C120
Kompozyt 2	70 % PP/30 % C120
Kompozyt 3	60 % PP/40 % L9
Kompozyt 4	70 % PP/30 % L9

Metodyka badań

Badania mikrobiologiczne obejmowały oznaczenie ilości osadu tworzącego błonę biologiczną na powierzchni poszczególnych próbek oraz identyfikację i liczebność mikroorganizmów występujących na kształtkach i w osadzie czynnym komory nityfikacji. Co dwa miesiące pobierano dwie próbki tego samego kompozytu (łącznie 10 wiosełek wykonanych z PP i czterech kompozytów). Jedną z dwóch pobranych próbek płukano w 100 cm^3 wody jałowej, natomiast z drugiej cały osad zeskrobywano do jałowych naczynek wagowych. Takie postępowanie umożliwiło pozyskanie wszystkich rodzajów mikroorganizmów występujących na powierzchni badanych materiałów – zarówno form osiadłych, pełzających i swobodnie pływających, jak i bakterii bezpośrednio związanych z wytworzonym biofilmem. Ilość pozyskanego osadu (wypłukanego i zeskrobanego) oce-

niano wizualnie, następnie wykonano z niego preparaty mikroskopowe. Przygotowano po 3 preparaty: z każdej próbki na szkiełko przedmiotowe nanoszono po 0,2 cm^3 wypłukanego lub zeskrobanego osadu i przykrywano go szkiełkiem nakrywkowym o boku 20 \times 20 mm. W badanych próbkach oznaczano rodzaje (taksony) występujących mikroorganizmów, określano także ich średnią liczebność (z trzech preparatów). Obserwacje prowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Carl Zeiss Jena z okulem 12,5 \times , obiektywem 5 \times , 10 \times i 40 \times oraz powiększeniem tubusa 1,5 \times , przy powiększeniu 93,75 \times i/lub 187,5 \times i/lub 750 \times . Liczebność występujących mikroorganizmów z danego taksonu określano metodą szacunkową w skali 5 stopniowej: bardzo liczne (5 pkt.), liczne (4 pkt.), dość liczne (3 pkt.), niezbyt liczne (2 pkt.) i pojedyncze (1 pkt.) [13–19]. Największą średnią szacunkową liczebność (częstotliwość zasiedlenia, szacunkowy udział z próbek zeskrobanych i wypłukanych) wszystkich mikroorganizmów pozyskanych w całym okresie badawczym przyjęto jako 100 %, natomiast pozostałe próbki oszacowano w odniesieniu do liczebności próbki maksymalnej [20–25].

Zwilżalność powierzchni badanych materiałów oceniano na podstawie wartości kąta zwilżania ich wodą destylowaną, wyznaczonych metodą pomiaru bezpośredniego. Swobodna energia powierzchniowa wody $\gamma_L = 72,8 \text{ mJ/m}^2$, składowa dyspersyjna $\gamma_L^d = 21,8 \text{ mJ/m}^2$, polarna $\gamma_L^p = 51,0 \text{ mJ/m}^2$.

Szczegółową metodykę pomiaru kąta zwilżania omówiono w poprzedniej pracy [19].

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Badania mikrobiologiczne

W tabeli 2 zestawiono wyniki analizy mikroskopowej osadu zeskrobanego oraz wypłukanego w całym okresie badawczym 12 miesięcy. Okres ten przyjęto za reprezentatywny (nośniki wykorzystywane w technologii złoża ruchomego przebywają w bioreaktorach zwykle od 3 do 5 lat).

Przykładowe mikroorganizmy (taksony) pozyskane z powierzchni kompozytów w ciągu 12 miesięcy przedstawiono na rys. 3.

Na podstawie ilości osadu tworzącego błonę biologiczną na powierzchni próbek w ciągu 12 miesięcy badań stwierdzono, że największe średnie powinowactwo do osadzania i bytowania błony biologicznej wykazywał kompozyt 3, następnie kompozyt 2 oraz kompozyty 4 i 1, najmniejsze – polipropylen (PP), oznaczony jako materiał osnowy.

Nieco inną kolejność analizowanych próbek uzyskano pod względem średniej liczebności mikroorganizmów występujących w błonie biologicznej w ciągu 12 miesięcy badań. Na rys. 4. przedstawiono względną średnią ilość wszystkich mikroorganizmów bytujących na badanych kształtkach wykonanych z różnych materiałów.

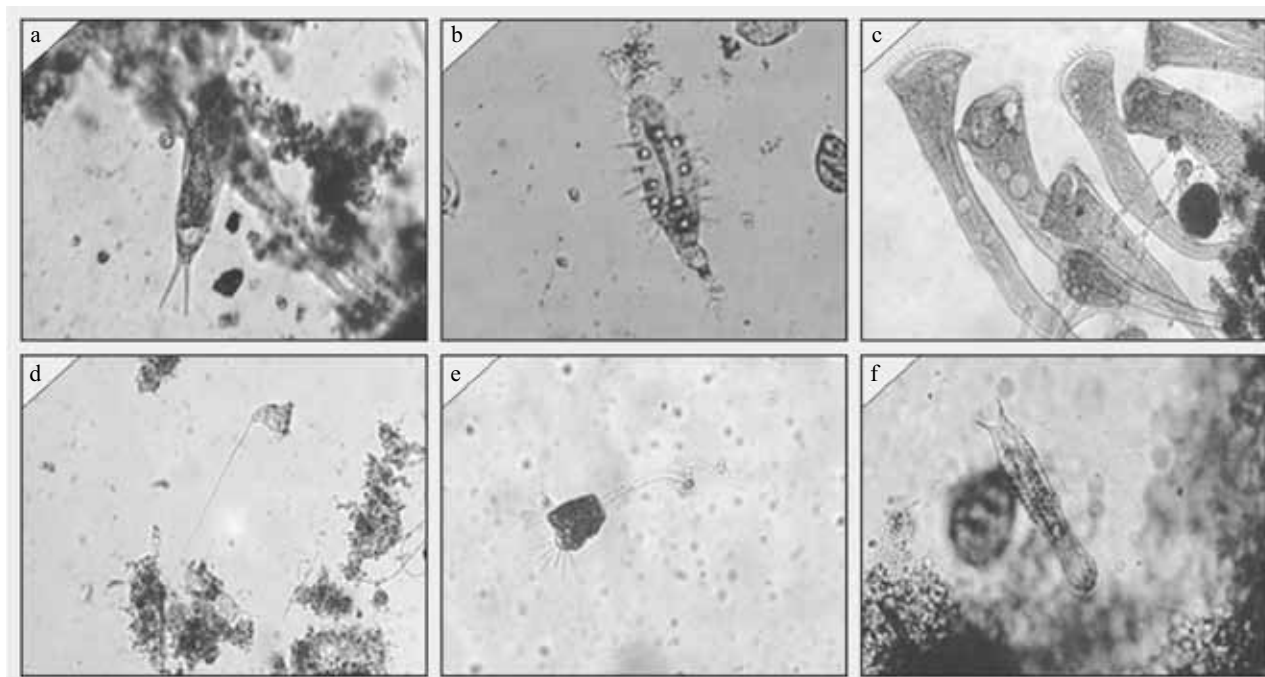
T a b e l a 2. Wyniki analizy mikroskopowej pozyskanego osadu, zeszkrobanego i wypłukanego z badanych materiałów w całym okresie badawczym, wraz z obliczeniami

T a b e l e 2. Results of microscopic analysis of scraped and rinsed sludge from studied specimens with calculations made over the entire investigation period

Organizmy osadu czynnego	Oznaczenie									
	Materiał osnowy		Kompozyt 1		Kompozyt 2		Kompozyt 3		Kompozyt 4	
	WL	SK	WL	SK	WL	SK	WL	SK	WL	SK
Wiciowce (<i>Flagellata</i>)										
<i>Peranema trichophorum</i> <i>Bodo sp.</i>	0,1	P	0,3	P	0,7	P	0,9	P	0,5	P
Korzenionózki (<i>Rhizopoda</i>)										
<i>Arcella sp.</i>	1,0	P	1,3	NL	1,8	NL	1,8	NL	0,9	P
<i>Amoeba sp.</i>	0,5	P	0,3	P	0,6	P	0,6	P	0,6	P
Orzęski (<i>Ciliata</i>)										
<i>Paramecium caudatum</i>	0,6	P	1,4	NL	2,0	NL	2,0	NL	1,2	NL
<i>Paramecium bursaria</i>	0,2	P	0,7	P	0,7	P	0,9	P	0,6	P
<i>Epistylis lacustris</i>	3,0	DL	3,7	L	3,6	L	3,9	L	3,4	L
<i>Epistylis plicatilis</i>	2,9	DL	3,8	L	3,1	L	3,3	L	3,3	L
<i>Epistylis rotans</i>	2,0	NL	2,4	DL	2,3	DL	1,7	NL	2,5	DL
<i>Epistylis coronata</i>	1,2	NL	2,4	DL	2,1	DL	1,8	NL	1,8	NL
<i>Epistylis chrysemydis</i>	2,4	DL	2,5	DL	2,5	DL	2,9	DL	1,7	NL
<i>Opercularia coarctata</i>	1,5	NL	2,9	DL	0,4	P	2,4	DL	1,5	NL
<i>Vorticella convallaria</i>			0,1	P			0,5	P	0,1	P
<i>Vorticella microstoma</i>	0,9	P	1,2	NL	0,9	P	0,3	P	1,5	NL
<i>Vorticella campanula</i>	0,1	P			0,1	P				
<i>Carchesium polypinum</i>	0,7	P	1,2	NL	0,6	P	1,1	NL	1,3	NL
<i>Discophrya elongata</i>	0,1	P			0,2	P	0,1	P	0,3	P
<i>Tokophrya sp.</i>	0,8	P	0,8	P	0,4	P	0,6	P	0,7	P
<i>Acineta sp.</i>	0,4	P	0,4	P	0,3	P	0,5	P	0,2	P
<i>Podophrya fixa</i>					0,1	P	0,2	P		
<i>Stentor sp.</i>			0,4	P	0,3	P	1,1	NL	0,4	P
<i>Litonotus sp.</i>	0,7	P	1,2	NL	1,6	NL	1,6	NL	0,4	P
<i>Aspidisca sp.</i>	1,0	P	1,3	NL	1,5	NL	1,6	NL	1,2	NL
<i>Spirostomum sp.</i>	0,1	P	0,6	P	0,7	P	0,1	P	0,1	P
<i>Trachelophyllum pusillum</i>			0,1	P	0,3	P	0,4	P		
<i>Glaucoma sp.</i>	0,2	P	0,4	P	0,5	P	0,5	P	0,2	P
<i>Colpoda steini</i>									0,1	P
<i>Colpidium colpoda</i>			0,2	P						
<i>Chilodonella sp.</i>									0,1	P
<i>Tetrahymena sp.</i>							0,1	P		
<i>Strombidium sp.</i>			0,1	P	0,2	P	0,2	P	0,3	P
<i>Trichodina pediculus</i>			0,2	P			0,1	P	0,1	P
<i>Metopus sp.</i>							0,1	P		
Wrotki (<i>Rotatoria</i>)										
<i>Lecane sp.</i>	0,4	P	0,5	P	0,6	P	0,8	P	0,4	P
<i>Rotaria rotatoria</i>	0,7	P	1,6	NL	2,1	DL	2,1	DL	1,0	P
<i>Philodina sp.</i>			0,1	P	0,6	P	0,6	P	0,7	P
<i>Cephalodella sp.</i>							0,1	P	0,2	P
Nicienie (<i>Nematoda</i>)										
<i>Nematoda n.det.</i>	0,2	P	0,2	P	0,2	P	0,2	P	0,3	P
Niesporczaki (<i>Tardigrada</i>)										
<i>Tardigrada n.det.</i>	0,5	P	0,2	P	0,5	P	0,1	P	0,2	P
Brzuchorzęski (<i>Gastrotricha</i>)										
<i>Gastrotricha n.det.</i>	0,1	P	0,1	P					0,3	P
Skąposzczety (<i>Oligochaeta</i>)										
<i>Aelosoma sp.</i>	0,8	P	0,4	P	0,6	P			0,4	P
Bakterie i grzyby (<i>Bacteria i Fungi</i>)										
Bakterie swobodnie pływające	1,0	P	1,0	P	1,0	P	1,7	NL	1,1	NL
Bakterie i grzyby nitkowate	1,2	NL	0,9	P	1,2	NL	1,1	NL	1,1	NL
Σ częstotliwości zasiedlenia (WL)	25,3		34,9		34,3		38,0		30,8	
Miejsce wg zasiedlenia organizmów (liczebności organizmów)	5		2		3		1		4	
% udział zasiedlenia (liczebności organizmów)	66,6		91,8		90,3		100,0		81,0	
Miejsce wg ilości osadu	5		4		2		1		3	
Liczba taksonów	29		34		33		36		37	

WL – średnia wartość liczbową częstotliwości zasiedlenia organizmów, SK – skala końcowa: BL = bardzo liczne (4,1–5,0), L = liczne (3,1–4,0), DL = dość liczne (2,1–3,0), NL = niezbyt liczne (1,1–2,0), P = pojedyncze (0,0–1,0).

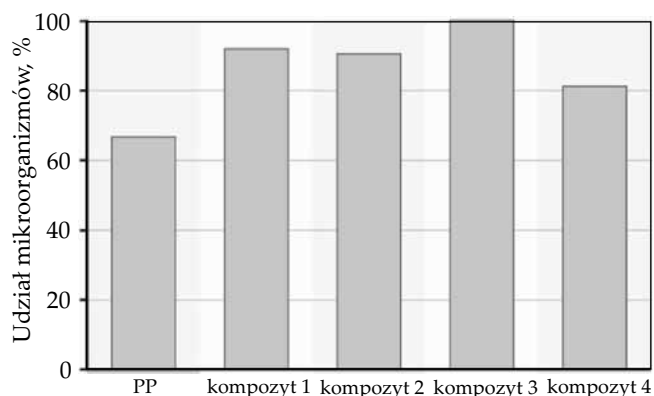
WL – average value of frequency of microorganism colonisation, SK – final scale: BL = very numerous (4.1–5.0), L = numerous (3.1–4.0), DL = quite numerous (2.1–3.0), NL = not numerous (1.1–2.0), P = single (0.0–1.0).



Rys. 3. Mikroorganizmy występujące na poszczególnych kompozytach: a) wrotki (*Rotatoria*): *Cephalodella* sp. (występują tylko na próbkach kompozytu 3 i 4), b) orzęski (*Ciliata*): *Discophrya elongata* (nie występują na próbce kompozytu 1), c) orzęski (*Ciliata*): *Stentor* sp. (nie występują na próbce osnowy PP), d) orzęski (*Ciliata*): *Vorticella campanula* (występują na próbkach osnowy PP i kompozytu 2), e) orzęski (*Ciliata*): *Tokophrya* sp. (występują na próbkach wszystkich badanych materiałów), f) brzuchorzęski (*Gastrotricha*): *Gastrotricha* n.det. (nie występują na próbkach kompozytów 2 i 3)

Fig. 3. Microorganisms occurring on individual composites: a) Rotifers (*Rotatoria*): *Cephalodella* sp. (only found on the composites 3 and 4), b) Ciliates (*Ciliata*): *Discophrya elongata* (not present on the composite 1), c) Ciliates (*Ciliata*): *Stentor* sp. (not present on the matrix PP material), d) Ciliates (*Ciliata*): *Vorticella campanula* (only found on the matrix PP material and composite 2), e) Ciliates (*Ciliata*): *Tokophrya* sp. (found on all composites and the matrix PP material), f) Gastrotrichs (*Gastrotricha*): *Gastrotricha* n.det. (not present on the composites 2 and 3)

Średnią ilość mikroorganizmów obliczano na podstawie analizy preparatów wykonanych z próbek zeszkrobanych i wypłukanych. Największą stwierdzoną średnią liczebność organizmów przyjęto jako 100 % (kompozyt 3), natomiast liczebność mikroorganizmów na pozostałych próbkach odniesiono do liczebności na próbce maksymalnej. Najmniejsze zagęszczenie organizmów (66,6 %)



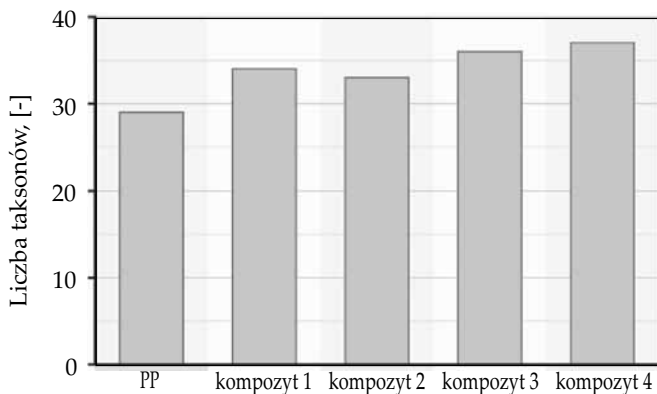
Rys. 4. Szacunkowy udział mikroorganizmów (%) osadzonych na próbkach materiału osnowy i kompozytów

Fig. 4. Estimated proportion of microorganisms (%) deposited on the specimens of matrix material and composites

stwierdzono na powierzchni kształtek wykonanych z polipropylenu (rys. 4).

Wśród mikroorganizmów występujących na powierzchniach badanych kształtek wykonanych z kompozytów oraz z czystego PP zdecydowanie przeważały orzęski, których osiadło najwięcej, liczne były także wrotki (*Rotaria rotatoria*) oraz ameby (*Arcella vulgaris*), mimo że w wielu wypadkach ich liczebność bezpośrednio w komorze osadu czynnego była mniejsza. Świadczy to o korzystnym oddziaływaniu badanego podłoża stałego na długotrwałe osadzanie się mikroorganizmów. Podczas okresowych badań osadu czynnego występującego w komorze nityfikacji, w której zawieszono badane wiosełka, również stwierdzono obecność wszystkich mikroorganizmów zasiedlających zarówno PP, jak i kompozyty. W osadzie czynnym, podobnie jak na powierzchni kształtek, zaobserwowano wyraźne wahania liczebności bakterii swobodnie pływających oraz nitkowatych.

Liczba taksonów mikroorganizmów wykrytych w całym okresie badawczym (12 miesięcy) na powierzchni kompozytu 4 była największa (37 taksonów), natomiast najmniejsza (29 taksonów) – na powierzchni polipropylenu. Można przypuszczać, że skład kompozytów wpływa na tworzenie się na ich powierzchni błony biologicznej (por. tabela 2). Liczbę wykrytych w ciągu roku taksonów mikroor-



Rys. 5. Liczba taksonów mikroorganizmów wykrytych na powierzchni badanych materiałów w całym okresie badawczym (12 miesięcy)

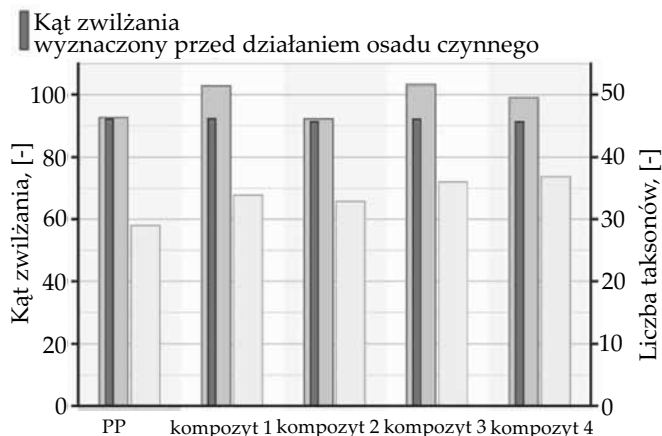
Fig. 5. Number of taxa of microorganisms detected on the surface of studied materials over the entire investigation time period (12 months)

ganizmów zasiedlających badane powierzchnie kształtek umieszczonych w bioreaktorze przedstawia rys. 5.

Zwilżalność powierzchni próbek kompozytowych

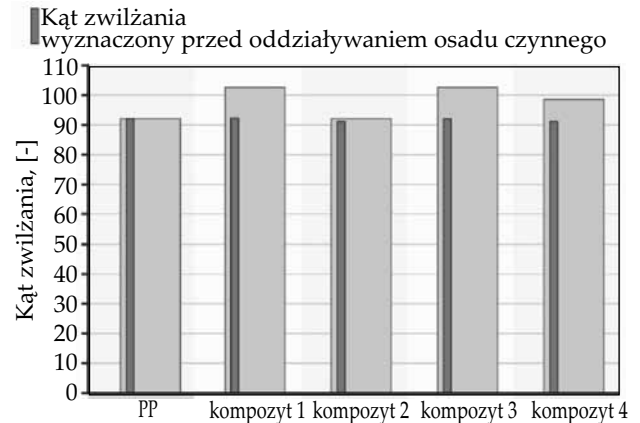
Po upływie 12 miesięcy przebywania kształtek w reaktorze wyznaczono kąt zwilżania powierzchni poszczególnych próbek PP i kompozytów. Uzyskane wartości porównano z wartościami odpowiadającymi materiałom referencyjnym, niepoddanym działaniu osadu czynnego (przed umieszczeniem próbek w bioreaktorze) (rys. 6).

Stwierdzono bezpośredni związek składu badanego materiału i czasu oddziaływania osadu czynnego na powierzchnię z wartością kąta zwilżania. Kąt zwilżania kompozytów zawierających mniejszą ilość (30 % mas.) napelnacza, niezależnie od jego rodzaju, nie zmienił



Rys. 7. Wartość kąta zwilżania w zestawieniu z liczbą taksonów mikroorganizmów wykrytych na badanych kształtkach w całym okresie badawczym (12 miesięcy)

Fig. 7. Values of contact angle against the number of taxa detected on individual materials over the entire investigation period (12 months)

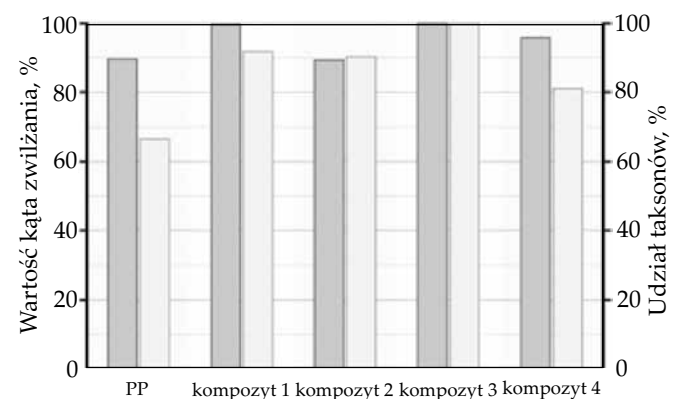


Rys. 6. Wartości kąta zwilżania (θ) próbek badanych materiałów Fig. 6. Values of contact angle (θ) of the specimens of studied materials

się w istotnym stopniu w porównaniu z kątem zwilżania powierzchni materiału osnowy PP. W wypadku kompozytów z udziałem 40 % mas. mączki drzewnej kąt zwilżania się zwiększał. Wydłużenie czasu ekspozycji na działanie osadu czynnego do 12 miesięcy pogarszało zwilżalność powierzchni badanych próbek, co świadczy o trwałym skolonizowaniu struktury materiału polimero-drzewnego.

Rysunki 7 i 8 przedstawiają wartości kąta zwilżania badanych próbek kompozytów w zestawieniu z liczbą stwierdzonych taksonów (rys. 7) i średnią szacunkową liczebnością wykrytych mikroorganizmów (rys. 8).

Zwilżalność powierzchni związana z energią powierzchniową materiału jest przydatnym parametrem służącym do oceny biologicznych oddziaływań między materiałem a organizmem żywym. Na podstawie wartości kąta zwilżania zestawionych z liczbą taksonów występujących mikroorganizmów stwierdzono (rys. 7), że wraz ze wzrostem ich liczby powierzchnia materiału staje się



Rys. 8. Szacunkowy udział mikroorganizmów (%) oraz procentowa wartość kąta zwilżania (%) w całym okresie badawczym (12 miesięcy)

Fig. 8. Estimated proportion of microorganisms (%) and percentage of contact angle value (%) over the entire investigation period (12 months)

bardziej hydrofobowa. Jest to szczególnie zauważalne w wypadku kompozytu 3 (60 % PP/40 % L9), gdzie wartość kąta zwilżania wynosi 103,2° a liczba taksonów 36.

Powierzchnia materiałów niepoddana działaniu osadu czynnego wykazywała charakter hydrofilowy, co korzystnie wpłynęło na osadzanie się mikroorganizmów – tworzenie biofilmu.

Wartość kąta zwilżania równą 103,2° przyjęto jako największą. W odniesieniu do tej wartości (100 %) obliczono względną procentową wartość kąta zwilżania badanych kompozytów. W odniesieniu do próbki kompozytu 3 zaobserwowano największą wartość θ a jednocześnie największą szacunkową liczebność mikroorganizmów (rys. 8).

Powierzchnia kształtek polipropylenowych wykazywała natomiast najmniejszą szacunkową liczebność mikroorganizmów i najmniejszą względną wartość kąta zwilżania. Stwierdzono bezpośredni związek między wartością kąta zwilżania a ilością mikroorganizmów kolonizujących powierzchnię kompozytów.

PODSUMOWANIE

Na podstawie wyznaczonej wartości kąta zwilżania określono charakter powierzchni wytworzonych kompozytów na osnowie PP z udziałem mączki drzewnej. Stwierdzono, że czynnikiem sprzyjającym tworzeniu biofilmu w technologii MBBR jest początkowa hydrofiliowość materiału, determinująca jego dużą zwilżalność, co skutkuje dobrą, umożliwiającą kolonizację adhezją mikroorganizmów do powierzchni stosowanych kształtek.

Biofilm wytworzony na powierzchni badanych materiałów wpłynął na zwiększenie kąta zwilżania. Największą wartość θ wykazywał kompozyt 3 zawierający największą ilość napełniacza (40 % mas.) o największych rozmiarach cząstek (0,8–1,1 mm). Na powierzchni tego kompozytu wykryto, w całym 12-miesięcznym okresie badawczym, obecność mikroorganizmów o największej szacunkowej liczebności oraz bardzo dużej liczbie (36) taksonów.

LITERATURA

- [1] Pervissian A., Parker W.J., Legg R.L.: *Environmental Progress and Sustainable Energy* **2012**, 31, 288. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.10547>
- [2] Yuan H.Z., Zhao J.B., Ke S.Z.: *Future Material Research and Industry Application* **2012**, 455–456, 1030.
- [3] Durai G., Rajasimman M., Rajamohan N.: *Journal of Biotech Research* **2011**, 3, 19.
- [4] Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Michałkiewicz M. i in.: *Polimery* **2014**, 59, 423. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.423>
- [5] Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Michałkiewicz M. i in.: *Polimery* **2014**, 59, 739. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.739>
- [6] Barberis F., Capurro M.: *Journal of Colloid and Interface Science* **2008**, 326, 201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.07.028>
- [7] González-Martín M., Labajos-Broncano L., Jańczuk B., Bruque J.M.: *Journal of Materials Science* **1999**, 341, 5923. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004767914895>
- [8] Ajaev V.S., Gambaryan-Roisman T., Stephan P.: *Journal of Colloid and Interface Science* **2010**, 342, 550. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2009.10.040>
- [9] Chibowski E., González-Caballero F.: *Journal of Adhesion Science and Technology* **1993**, 7, 1195.
- [10] Faibish R.S., Yoshida W., Cohen Y.: *Journal of Colloid and Interface Science* **2002**, 256, 341. <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.2002.8612>
- [11] Rudawska A., Danczak I., Müller M., Valasek P.: *International Journal of Adhesion and Adhesives* **2016**, 70, 176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010>
- [12] De Gennes P.G.: *Reviews of Modern Physics* **1984**, 57, 827.
- [13] Żenkiewicz M.: „Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”, WNT, Warszawa 2000.
- [14] Ahadian S., Mohseni M., Moradian S.: *International Journal of Adhesion and Adhesives* **2009**, 29, 458.
- [15] Chinnam J., Das D., Vajjha R., Satti J.: *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2015**, 62, 1. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.12.009>
- [16] Della Volpe C., Siboni S.: *Journal of Adhesion Science and Technology* **1998**, 12, 197. <http://dx.doi.org/10.1163/156856198X00065>
- [17] Extrand C.W., Kumagai Y.: *Journal of Colloid and Interface Science* **1997**, 191, 378. <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.1997.4935>
- [18] Extrand C.W.: *Journal of Adhesion Science and Technology* **2016**, 30, 1597. <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2016.1142799>
- [19] Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Rudawska A. i in.: *Polimery* **2017**, 62, 208. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.208>
- [20] Bazeli M.: „Mikroskopowa analiza organizmów nitkowatych”, Pracownia Biologiczna BIOM, Piła 2007.
- [21] Eikelboom D.H., van Buijsen H.J.J.: „Podręcznik mikroskopowego badania osadu czynnego”, Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Szczecin 1999.
- [22] Fiałkowska E., Fyda J., Pajdak-Stós A., Wiąckowski K.: „Osad czynny: biologia i analiza mikroskopowa”, Wydawnictwo Seidel-Przywecki sp. z o.o., Warszawa 2010.
- [23] Michałkiewicz M., Fiszer M.: „Biologia sanitarna. Ćwiczenia laboratoryjne”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
- [24] „Mikroskopowa analiza i ocena biologicznych procesów oczyszczania ścieków” (tłum. Szczygieł P.), Bawarski Krajowy Urząd Gospodarki Wodnej, Gdańska Fundacja Wody, Gdańsk 2004.
- [25] „Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków” (red. Dymaczewski Z.), PZHiTS Oddział Wielkopolski, Poznań 2011.