



Biosurfaktanty drobnoustrojów (część 1)

Microbial biosurfactants (part 1)

Katarzyna Paraszkievicz¹, Anna Kuśmierska¹

Katedra Mikrobiologii Przemysłowej i Biotechnologii
Instytut Mikrobiologii, Biotechnologii i Immunologii,
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

Streszczenie

Biosurfaktanty i surfaktanty (odpowiednio metabolity bakteryjne i ich syntetyczne odpowiedniki) dzięki swojej strukturze amfifilowej obejmującej zarówno ugrupowania hydrofilowe, jak i hydrofobowe, są związkami powierzchniowo czynnymi. Ze względu na swoją aktywność są w stanie brać udział w różnych procesach zachodzących na granicy faz, m.in. obniżają napięcie powierzchniowe i międzyfazowe oraz stabilizują emulsje i piany. Biosurfaktanty odgrywają zasadniczą rolę w ruchliwości i formowaniu biofilmów przez komórki bakteryjne, a także zwiększają rozpuszczalność i biodostępność związków hydrofobowych. Związki te są klasyfikowane ze względu na pochodzenie mikrobiologiczne, masę cząsteczkową, właściwości fizykochemiczne, sposób działania oraz strukturę chemiczną części hydrofilowej cząsteczki. Biosurfaktanty wykazują duży potencjał komercyjny w zakresie ochrony środowiska, np. zwiększają odzysk ropy naftowej i przyspieszają procesy biodegradacji/usuwania toksycznych zanieczyszczeń. Mogą być także stosowane w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle spożywczym, chemicznym, kosmetycznym, metalurgicznym oraz w rolnictwie, medycynie i farmacji.

Słowa kluczowe

biosurfaktant, surfaktant, napięcie powierzchniowe, krytyczne stężenie micelarne, naturalna rola fizjologiczna, zastosowania przemysłowe

Abstract

Biosurfactants and surfactants (microbial metabolites and synthetic counterparts, respectively) are surface-active compounds due to their amphiphilic structure with both hydrophilic and hydrophobic moieties. Therefore, they are able to generate various processes in the interfaces including the reduction of surface and interfacial tension as well as stabilization of emulsions and foams. Biosurfactants play an essential natural role in swarming motility and biofilm formation by microbial cells and also increase the solubility and bioavailability of hydrophobic compounds. They are classified according to their microbial origin, molecular weight, physico-chemical properties, mode of action, and the chemical structure of the molecule hydrophilic part. Biosurfactants exhibit a great commercial potential in environmental protection including enhanced oil recovery, the control of oil spills and biodegradation/ detoxification processes. They can also be used in various applications of food processing and in health, chemical, agricultural, cosmetic, mining and metallurgical industries.

Keywords

biosurfactant, surfactant, surface tension; critical micelle concentration; natural physiological role, industrial applications

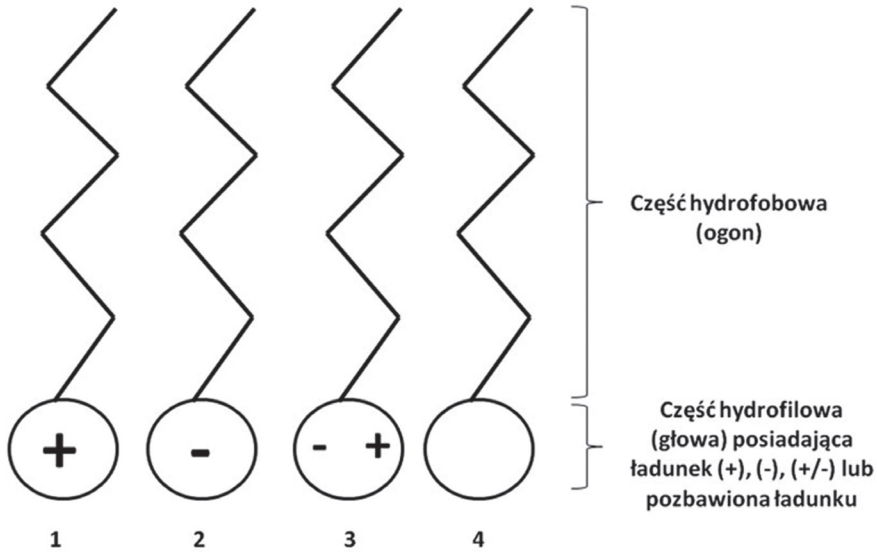
Cechy charakterystyczne i podział biosurfaktantów

Biosurfaktanty (*biological surface active agents*), to związki powierzchniowo czynne (ZPC) pochodzenia biologicznego. Wytwarzane są przez rośliny – np. saponiny obficie gromadzone w tkankach takich roślin takich jak mydlnica lekarska (*Saponaria officinalis* L.) czy też biosurfaktanty wydzielane przez komórki korzeni różnorodnych roślin do ryzosfery. ZPC pochodzenia zwierzęcego to m.in. lecytyna i tzw. surfaktant płucny. Niemniej najbardziej liczną grupą organizmów zdolnych do syntezy biosurfaktantów są drobnoustroje (głównie bakterie i drożdże). Charakterystyczną cechą tej grupy związków, jak również surfaktantów syntetycznych (otrzymywanych w wyniku przetwarzania składników ropy naftowej) jest amfipatyczna (amfifilowa) budowa, co oznacza, że cząsteczki zawierają jednocześnie część hydrofilową oraz część hydrofobową. Ze względu na ładunek części hydrofilowej surfaktanty dzielone są na jonowe (kationowe, anionowe i amfoteryczne) oraz niejonowe (Ryc. 1) [1, 2].

Większość mikrobiologicznych ZPC ma charakter obojętny lub anionowy, a tym samym jest mniej toksyczna dla organizmów w porównaniu z syntetycznymi odpowiednikami. Cząsteczki związków amfifilowych gromadzą się na granicy dwóch faz o przeciwnej polarności, co z kolei powoduje spadek napięcia międzyfazowego (określanego terminem napięcia powierzchniowego, w wypadku granicy między powietrzem i wodą). Zależnie od budowy chemicznej oraz rodzaju sąsiadujących ze sobą faz (powietrze/płyn; płyn/płyn; powierzchnia stała/powietrze lub powierzchnia stała/płyn) ZPC mogą brać udział w przebiegu i stabilizowaniu różnych, czasem przeciwstawnych procesów. Należą do nich m.in. obniżanie napięcia powierzchniowego i międzyfazowego, stabilizacja (lub destabilizacja) emulsji i pian, zwilżanie, koagulacja, dyspersja oraz działanie antystatyczne [3, 4, 5].

Najczęściej stosowane kryteria podziału mikrobiologicznych ZPC to budowa chemiczna części hydrofilowej oraz wielkość cząsteczek. Część hydrofilowa biosurfaktantów może zawierać fosforan, kwas karboksylowy, liniowy lub cykliczny peptyd, węglowodan, aminokwas lub alkohol. W skład domeny hydrofobowej wchodzi zazwyczaj reszta kwasu tłuszczowego, a w niektórych przypadkach hydrofobowe aminokwasy polipeptydu lub białka [6]. Zgodnie z tym podziałem mikrobiologiczne surfaktanty dzielone są na pięć klas: 1) glikolipidy, do których zaliczane

są ramnolipidy, soforolipidy, lipidy mannozyloerytritolu (MELs), lipidy trechalozy oraz lipidy celobiozy; 2) lipopeptydy i lipoproteiny; 3) kwasy tłuszczowe, fosfolipidy i lipidy obojętne; 4) biosurfaktanty złożone (np. glikolipoproteiny) oraz 5) biosurfaktanty specjalne obejmujące m.in. składniki fimbrii i otoczek (Tab. 1) [2,5].

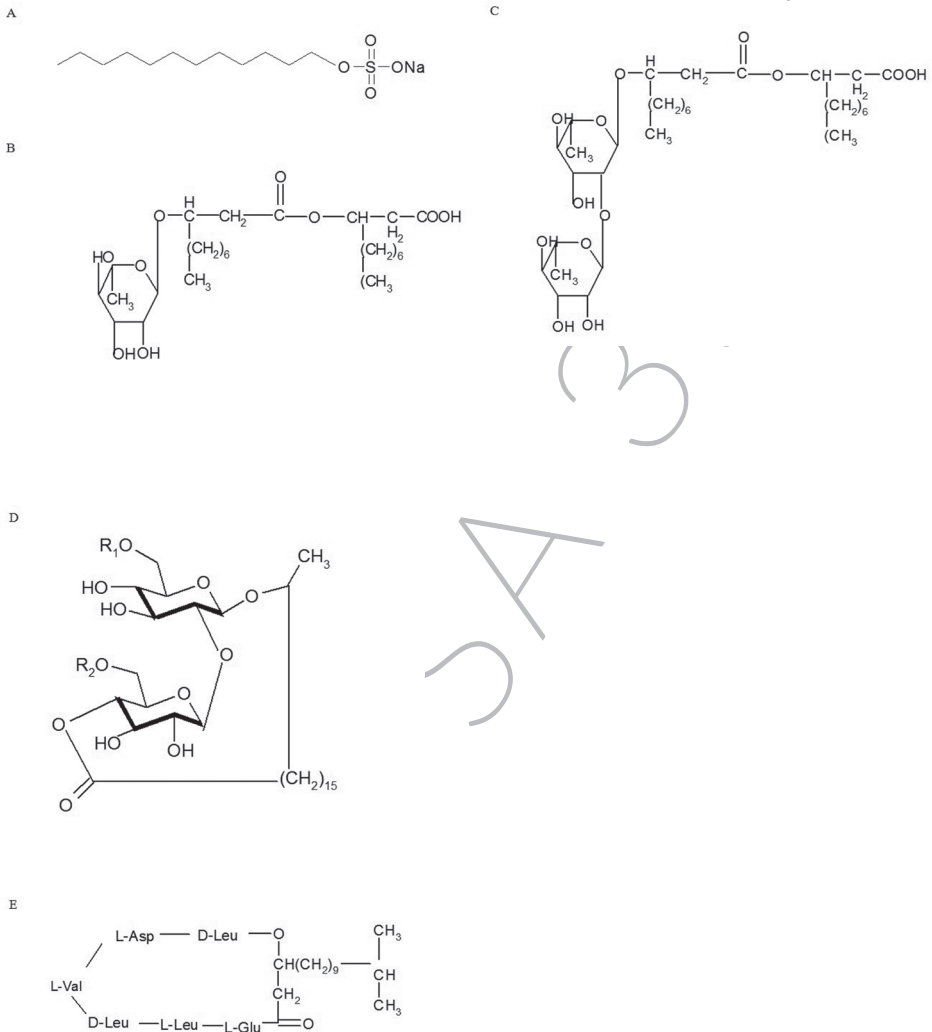


Rycina. 1. Schemat amfifilowej budowy cząsteczki surfaktantu. Ze względu na obecność i rodzaj ładunku części hydrofilowej wyróżniane są surfaktanty kationowe (1), anionowe (2), amfoteryczne (3) oraz niejonowe (4). Rysunek zmodyfikowany wg. [1, 2].

Tabela 1. Podział biosurfaktantów ze względu na budowę chemiczną i wielkość cząsteczek (N – surfaktanty niskocząsteczkowe; W – surfaktanty wysokocząsteczkowe). Tabela zmodyfikowana wg. [2, 7].

Klasa	grupa, rodzina ZPC lub przykład związku	Drobnoustrój
Glikolipidy (N)	Ramnolipidy	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Serratia</i> sp.
	Soforolipidy	<i>Candida bombicola</i> , <i>Candida apicola</i>
	Lipidy trehalozy	<i>Rhodococcus erythropolis</i> , <i>Arthrobacter</i> sp. <i>Mycobacterium</i> sp., <i>Corynebacterium</i> sp.
	Lipidy celobiozy	<i>Ustilago maydis</i>
	Lipidy mannozylo-erytritolu	<i>Pseudozyma</i> sp.
Lipopeptydy (N)	Rodziny: surfaktyny, ituryny, fengicyny, syringomycyna	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>Pseudomonas</i> sp.
Lipoproteiny (W)		<i>Lactobacillus</i> sp.
Kwasy tłuszczowe (N)		<i>Penicillium spiculisporum</i> <i>Corynebacterium lepus</i>
Fosfolipidy, Lipidy obojętne (W)		<i>Corynebacterium alcanolyticum</i> <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>
Złożone (W)*	Emulsan Rag 1	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> RAG 1
	Alasan	<i>Acinetobacter radioresistens</i> KA53
	Biodispersan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> A2
	Mannoproteina	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
	Liposan	<i>Candida lipolytica</i>
	inne	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Curvularia lunata</i> IM 2901
Specjalne(W)*	fimbrie, otoczki	<i>Staphylococcus aureus</i>

Wzory wybranych biosurfaktantów przedstawiono na Ryc. 2 [7].



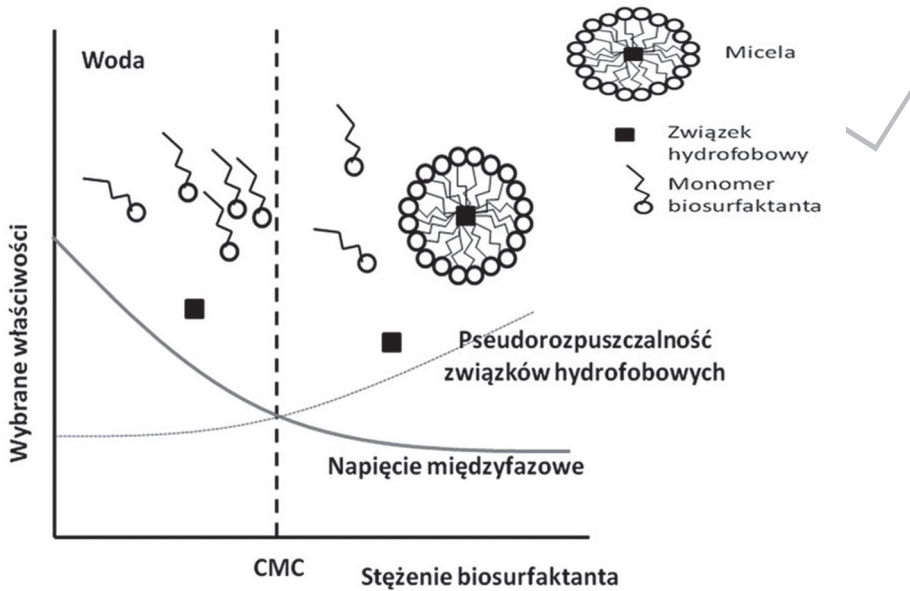
Rycina 2. Wzory strukturalne wybranych związków powierzchniowo czynnych: A) syntetyczny surfaktant dodecylosiarczan sodu (SDS); B) monoramnolipid* *P. aeruginosa* ($C_{26}H_{48}O_9$) o masie molowej 504 g; C) diramnolipid* *P. aeruginosa* ($C_{32}H_{58}O_{13}$) o masie molowej 650g; D) soforolipid (w postaci laktonu) wytwarzany przez *C. bombicola*; E) lipopeptyd surfaktyna *B. subtilis*.

*Przedstawione na rycinie ramnolipidy są dominującymi składnikami preparatu JBR 425, produkowanego przez Jeneil Biosurfactant Company, USA [8].

Zaproponowana przez Rosenberg i Ron (1999) [8] klasyfikacja wyróżnia nisko- i wysokocząsteczkowe biosurfaktanty. Do pierwszej grupy należą związki o masie nieprzekraczającej 2000 Da, zazwyczaj zdolne do bardzo silnego obniżania napięcia międzyfazowego i powierzchniowego. Przykładem takiego biosurfaktantu jest surfaktyna (cykliczny lipopeptyd o masie cząsteczkowej 1036 Da, wytwarzany przez szczepy różnych gatunków *Bacillus*, w tym przede wszystkim *B. subtilis* i *B. amyloliquefaciens*). Związek ten już w bardzo niskim stężeniu (13–30 mg/l) obniża napięcie powierzchniowe z 72 (wartość charakterystyczna dla układu woda/powietrze) do 27 mN/m, jest także silnie pianotwórczy, natomiast wykazuje niewielką aktywność emulgacyjną. Z kolei biosurfaktanty wysokocząsteczkowe (o masie dochodzącej nawet do 1000 kDa) to w większości efektywne emulgatory. Do takich biosurfaktantów należą m.in. lipoproteiny oraz związki z klasy biosurfaktantów złożonych (np. emulsan produkowany przez szczepy *Acinetobacter calcoaceticus*).

Badania aktywności powierzchniowej biosurfaktantów

Do ważnych parametrów charakteryzujących własności fizykochemiczne surfaktantów należą: krytyczne stężenie micelarne (*critical micelle concentration*, CMC), napięcie powierzchniowe, napięcie międzyfazowe, równoważnik hydrofilowo-lipofilowy (*hydrophile-lipophile balance*, HLB) oraz zdolność do stabilizowania (destabilizacji) emulsji i pian. Krytyczne stężenie micelarne obrazuje rozpuszczalność ZPC w wodzie. Dla surfaktantu w stężeniu CMC napięcie powierzchniowe osiąga najniższą wartość (Rys. 3). Po przekroczeniu stężenia CMC monomery biosurfaktantu agregują, formując różnego rodzaju skupienia. Najczęściej są to micelle, ale mogą to być także nanostruktury o charakterze rurek, układów dwuwarstwowych lub pęcherzyków [9]. Wartości CMC mikrobiologicznych ZPC zazwyczaj są o wiele niższe w porównaniu z surfaktantami syntetycznymi. Na przykład soforolipidy w stężeniu CMC, wynoszącym około 40 mg/l, powodują spadek napięcia powierzchniowego do wartości około 34 mN/m. Uzyskanie podobnego efektu dla dodecylosiarczanu sodu (SDS) wymaga użycia tego surfaktantu w wielokrotnie wyższym stężeniu (2120 mg/l). W środowisku wodnym ZPC formują tzw. micelle proste, w których cząsteczki eksponują domeny hydrofilowe na zewnątrz (Ryc. 3) [2].



Rycina 3. Schematyczne przedstawienie zależności między stężeniem surfaktantu w roztworze wodnym a napięciem międzyfazowym, zdolnością do formowania skupień (miceli) i rozpuszczania związków hydrofobowych; CMC (krytyczne stężenie micelarne).

Rysunek zmodyfikowany [2].

W takich układach obserwowany jest wzrost rozpuszczalności dodawanych związków hydrofobowych ponad granicę ich rozpuszczalności w wodzie. Zjawisko wynika z łokowania się cząsteczek wprowadzanego związku w hydrofobowym wnętrzu skupień biosurfaktantu i określane jest mianem pseudorozpuszczania. Natomiast w płynach niepolarnych formowane są tzw. micelle odwrócone. Napięcie powierzchniowe wyznaczone jest przy użyciu tensjometru. Badanie to pozwala wyznaczyć jednocześnie wartość CMC oraz charakterystyczne dla danego surfaktantu napięcie powierzchniowe. W celu porównywania aktywności różnych surfaktantów napięcie międzyfazowe zazwyczaj wyznaczone jest na granicy n-heksadkanu i wodnego roztworu surfaktantu, dodanego w stężeniu CMC. Wartość HLB określa stopień hydrofobowości związku [10]. Parametr ten używany jest przede wszystkim do charakteryzowania aktywności emulgacyjnej syntetycznych surfaktantów. Jako wzorce hydrofobowości przyjęto kwas oleinowy oraz oleinian sodu, którym przyporządkowano

odpowiednio najniższą wartość równą 1 i najwyższą – równą 20 w skali HLB. Wzrost wartości HLB oznacza wyższą hydrofilowość związku. Biosurfaktanty, dla których wartość HLB nie przekracza 6, tworzą emulsje typu „woda w oleju” (olej tworzy fazę ciągłą, w której zawieszono są kropelki wody). Z kolei związki o wartościach HLB mieszczących się w zakresie 10–18 tworzą emulsje typu „olej w wodzie”. Do określenia aktywności emulgacyjnej (E_{24}) wykorzystuje się próbki płynów pochodzących, które miesza się intensywnie z równoważną objętością płynu o charakterze hydrofobowym. Najczęściej są to mieszaniny węglowodorów lub czyste węglowodory, takie jak: kerosen – mieszanina płynnych węglowodorów, mieszanina heksadekanu i 2-metylnaftalenu lub sam heksadekan. Po 24 godzinach określana jest zawartość stabilnej emulsji w próbie i/lub gęstość optyczna emulsji (najczęściej przy długości fali $\lambda=600$ nm).

Rola fizjologiczna biosurfaktantów

Zdolność drobnoustrojów do produkcji biosurfaktantów jest bardzo powszechna, co tłumaczy się wysokim stosunkiem powierzchni komórek (szczególnie bakteryjnych) do ich objętości. Biosurfaktanty biorą udział w generowaniu różnych procesów na granicy faz, w tym także na granicy komórki i środowiska zewnętrznego, poprzez wpływ na fizjologię i procesy metaboliczne bakterii. Zdolność do produkcji biosurfaktantów jest często opisywaną cechą drobnoustrojów wykorzystujących jako źródło węgla i energii alkanany oraz węglowodory aromatyczne. Wynika to z faktu, że ZPC zwiększają rozpuszczalność związków hydrofobowych w roztworach wodnych, biorą udział w stabilizowaniu mikroemulsji oraz wpływają na hydrofobowość powierzchni komórek, a tym samym w istotny sposób zwiększają dostępność i przyspieszają transport hydrofobowych składników odżywczych [11, 12]. Obecność biosurfaktantów może wpływać zarówno na poszczególne komórki, jak i całe populacje. Na przykład niektóre cykliczne lipopeptydy wytwarzane przez bakterie z rodzaju *Bacillus* i *Pseudomonas*, poza bardzo wysoką aktywnością powierzchniową, charakteryzują się aktywnością biologiczną, m.in. działaniem przeciwdrobnoustrojowym, zdolnością do aktywowania indukowanej odporności systemicznej roślin (*Induced Systemic Resistance*, ISR), biorą udział w ruchu rozpełzliwym (*swarming motility*) oraz w formowaniu biofilmów [13, 14, 15]. Van Hamme i wsp. (2006) [4] zaproponowali podział funkcji mikrobiologicznych surfaktantów na:

1. wewnątrzkomórkowe (pobieranie i przechowywanie związków odżywczych, regulacja aktywności genów i enzymów);
2. zewnątrzkomórkowe (ruch ślizgowy oraz modulowanie hydrofobowości osłon komórkowych wpływające na zdolność komórek do adhezji/desorpcji,
3. międzykomórkowe – populacyjne, np. formowanie biofilmów, udział w oddziaływaniach antagonistycznych, patogenezie.

Przykładem biosurfaktantów o stosunkowo dobrze rozpoznanej roli fizjologicznej są soforolipidy produkowane przez osmofilne drożdże m.in. *Candida apicola* i *C. bombicola*. Większość szczepów zdolnych do wytwarzania soforolipidów wyizolowano ze środowisk związanych z pszczołami i trzmielami (miód, płatki kwiatów, powierzchnia czerwii). Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że soforolipidy mogą stanowić dla produkujących je szczepów jedyne źródło węgla. Tym samym synteza soforolipidów może być dla drożdży sposobem na obniżenie ciśnienia osmotycznego oraz otrzymanie zewnątrzkomórkowego i jednocześnie mniej dostępnego dla innych organizmów materiału zapasowego. Ponieważ soforolipidy wykazują silne działanie przeciwdrobnoustrojowe, synteza tych związków prawdopodobnie dodatkowo ułatwia produkującym je szczepom utrzymanie zajmowanej niszy ekologicznej [16, 17].

Kierunki wykorzystania biosurfaktantów

Możliwości stosowania biosurfaktantów obejmują przede wszystkim procesy wydobywania i transportu ropy naftowej [18, 19] przemysł spożywczy i rolnictwo [20,21] bioremediację [12, 22], przemysł kosmetyczny [23] oraz farmację i medycynę [24, 25]. Potencjał komercyjny biosurfaktantów został opisany także w innych pracach przeglądowych [26, 27].

Przemysł petrochemiczny i górnictwo

Dodatek niektórych biosurfaktantów bardzo silnie obniża lepkość, a tym samym ułatwia przepompowywanie i transport rurociągami oleistych frakcji ropy naftowej. Związki powierzchniowo czynne zwiększają także efektywność mycia urządzeń, w których magazynowana jest ropa naftowa. Dotyczy to przede wszystkim czyszczenia ładowni tankowców, ponieważ ciężkie frakcje ropy, osadzające się na dnie zbiorników, zmniejszają ładowność statków. W powyższych aplikacjach biosurfaktanty można stosować w formie nieoczyszczonej – w postaci całych hodowli

lub płynów pochodowlanych. Brak konieczności izolacji i oczyszczania biosurfaktantów bardzo obniża koszty użycia tych związków. Zastąpienie syntetycznych surfaktantów związkami pochodzenia biologicznego jest korzystne nie tylko z punktu widzenia ochrony środowiska. Ma także korzystny wpływ na bezpieczeństwo pracy. Złoża ropy naftowej, których nie opłaca się eksploatować tradycyjnymi metodami, często zawierają znaczną ilość surowca zalegającego w przestrzeniach kapilarnych skały. Z takich miejsc można wydobywać ropę naftową, stosując tzw. przepłukiwanie złoża. Metody określane terminem MEOR (*Microbial Enhanced Oil Recovery*) wykorzystują właśnie zdolność drobnoustrojów do wytwarzania biosurfaktantów. Obecność tych związków w złożu przyspiesza desorpcję i zwiększa efektywność wydobywania węglowodorów. Metoda MEOR *ex situ* polega na wprowadzaniu do złoża hodowli drobnoustrojów namnożonej uprzednio w bioreaktorze, natomiast w technice MEOR *in situ* biosurfaktanty wytwarzane są bezpośrednio w złożu (przez szczepy wprowadzane do miejsca odwiertu albo przez mikroflorę autochtoniczną). Obie te techniki są stosunkowo tanie i wymagają jedynie kontrolowanego dostarczania składników odżywczych, wspomagających wzrost bakterii i produkcję ZPC [28, 29, 30]. Biosurfaktanty, wiążąc się z hydrofobową powierzchnią minerałów, przeciwdziałają ich flokulacji. Zjawisko to wykorzystywane jest do podwyższania wydajności wydobywania i transportu wapienia w obecności biodispersanu (biosurfaktantu *Acinetobacter calcoaceticus* A2). Biosurfaktanty różnych szczepów bakterii m.in. z rodzaju *Corynebacterium*, *Nocardia*, *Arthrobacter* stosowane są do stabilizacji zawiesin węglowych.

Bioremediacja środowiska

Biosurfaktanty mogą być stosowane do oczyszczania zarówno ścieków, jak i gleby. Związki te przyspieszają rozkład hydrofobowych zanieczyszczeń organicznych oraz zwiększają efektywność usuwania jonów metali. Dlatego biosurfaktanty są szczególnie przydatne do bioremediacji środowisk skażonych jednocześnie związkami ropopochodnymi i metalami ciężkimi [12, 31, 32, 33]. Anionowe biosurfaktanty (głównie ramnolipidy, soforolipidy i surfaktyna) mogą być wykorzystywane do remediacji gleby metodami wypłukiwania zanieczyszczeń biosurfaktantami wprowadzanymi do gleby w postaci roztworu lub piany (*soil extraction - flushing/washing*). W obecności ZPC dochodzi do spadku

napięcia międzyfazowego (na granicy faza stała/roztwór wodny), co w efekcie przyspiesza desorpcję hydrofobowych zanieczyszczeń oraz metali ciężkich z powierzchni cząstek gleby. Desorpcję ułatwia także utrzymywanie przez biosurfaktanty stosunkowo niskiego stężenia zanieczyszczeń w fazie wodnej. Jest to wynikiem przenikania hydrofobowych zanieczyszczeń do wewnętrznej (lipofilnej) przestrzeni miceli surfaktantów oraz wiązania kationów metali przez ujemnie naładowane domeny tych związków [34, 35]. Stosowane w metodach przepłukiwania gleby syntetyczne surfaktanty (np. SDS), pomimo niskiej ceny, charakteryzują się, w porównaniu z mikrobiologicznymi ZPC, dłuższym czasem biodegradacji i wyższą toksycznością. Dodatkową zaletą biosurfaktantów (szczególnie ramnolipidów) jest większe powinowactwo do metali ciężkich niż do wpływających na żyzność gleby jonów potasu, magnezu i wapnia.

Przemysł kosmetyczny

Soforolipidy produkowane przez *C. apicola* i *C. bombicola* wykazują duże powinowactwo do skóry oraz mają właściwości nawilżające. Związki te wchodziły w skład różnych kosmetyków przeznaczonych zarówno do makijażu, jak i pielęgnacji skóry oraz włosów. Produkty kosmetyczne z dodatkiem soforolipidów po raz pierwszy wprowadziła na rynek japońska firma Kao Co Ltd [17, 18].

Przemysł farmaceutyczny i medycyna

Wiele biosurfaktantów, głównie z grupy lipopeptydów i glikolipidów, wskazywanych jest jako potencjalne środki terapeutyczne [19, 36]. Potencjalne antybiotyki to m.in. lipopeptydy wytwarzane przez szczepy *B. subtilis* (ituryna i surfaktyna), *B. brevis* (gramicydyna S) oraz *B. polymyxa* (polimyksyny). Mechanizm ich działania polega na zwiększaniu przepuszczalności, a następnie dezintegracji błon. Wykazano, że biosurfaktanty *Candida antarctica* hamują rozwój wielu bakterii Gram-dodatnich. Szczep *P. aeruginosa* AT10 produkuje mieszaninę ramnolipidów powodujących inhibicję wzrostu różnych bakterii i grzybów, m.in. *E. coli*, *Micrococcus luteus*, *Alcaligenes faecalis*, *Serratia marcescens*, *Mycobacterium phlei*, *Staphylococcus epidermidis*, *Aspergillus niger*, *Chaetomium globosum*, *Penicillium chrysogenum*, *Aureobasidium pullulans*. Do potencjalnych fungicydów należy także glikolipid produkowany przez *Pseudozyma fusi-*

formata oraz ituryna i fengicyna wytwarzane przez bakterie z rodzaju *Bacillus*. Inne lipopeptydy syntetyzowane przez *Bacillus* – surfaktyna i jej analog pumilacydyna, a także glikolipid produkowany przez *Rhodococcus erythropolis* wykazują aktywność przeciwwirusową. Mechanizm działania tych związków opiera się prawdopodobnie na niszczeniu osłony lipidowej, obecnej na cząstkach niektórych wirusów. Obecnie prowadzone badania m.in. koncentrują się na określeniu wpływu lipopeptydów i glikolipidów produkowanych przez bakterie z rodzaju *Bacillus*, *Candida* oraz *Streptosporangium* na komórki ssacze. W wyniku działania tych związków na komórki nowotworowe zaobserwowano zahamowanie proliferacji, stymulację różnicowania się komórek lub indukcję procesów prowadzących do apoptozy [37].

Inne potencjalne zastosowanie tych związków to ochrona różnych powierzchni przed rozwojem drobnoustrojów zdolnych do adhezji i tworzenia biofilmów. Na przykład lipopeptydy *Bacillus* hamowały proces formowania się drobnoustrojowych biofilmów i powodują rozpad już utworzonych biofilmów bakterii uropatogennych [38]. Przeciwbiofilmowa aktywność biosurfaktantów może być wykorzystana do ochrony jałowości powierzchni protez, implantów i cewników, powierzchni roboczych w zakładach przemysłu spożywczego czy też w ochronie sieci wodociągowych [39].

Znaczenie w farmakologii mogą mieć także biosurfaktanty zdolne do wiązania się z ludzkimi przeciwciałami IgG, hamowania działania niektórych enzymów lub przyspieszające rozpuszczanie skrzepów krwi. Biosurfaktanty stabilizujące emulsje mogą z kolei pełnić funkcję adiuwantów w szczepionkach lub ułatwiać transport i wchłanianie leków [40].

Rolnictwo

Wykazano, że obecność niektórych biosurfaktantów poprawia własności hydrofilowe gleby. Biosurfaktanty można także stosować jako dodatek do hydrofobowych nawozów sztucznych i pestycydów. Zabieg ten zwiększa rozpuszczalność i efektywność działania preparatów [13]. Z uwagi na aktywność lityczną ramnolipidów *P. aeruginosa* wobec zarodników fitopatogennych szczepów *Botrytis cinerea* i *Rhizoctonia solani*, zaproponowano wykorzystanie tych biosurfaktantów jako biofungicydów [21].

Przemysł spożywczy

Dodatek emulgatorów korzystnie wpływa na teksturę wielu produktów spożywczych. Obecnie rolę tę odgrywają przede wszystkim związki pochodzenia roślinnego oraz mikrobiologiczne wielocukry. Wykazano, że surfaktanty drożdży *Candida utilis* oraz mannoproteinę *S. cerevisiae* można wykorzystać jako czynniki stabilizujące emulsje w środkach spożywczych. Inną potencjalną funkcją biosurfaktantów jest modyfikacja własności reologicznych. Zdolność bioemulgatora *Enterobacter cloacae* do zwiększania lepkości w środowisku o niskim pH pozwala użyć tego związku w produktach stabilizowanych kwasem cytrynowym lub askorbinowym. L-ramnoza jest jednym z prekursorów środków zapachowych stosowanych w przemyśle spożywczym. Opracowano metodę otrzymywania tego związku na drodze hydrolizy ramnolipidów *P. aeruginosa* [41]. Ważnym zagadnieniem jest ochrona żywności przed rozwojem patogenych drobnoustrojów (m.in. z rodzaju *Listeria*, *Enterococcus*, *Salmonella*, *Proteus*) zdolnych do adhezji, wspomaganą wytwarzaniem biofilmów. Wykazano, że biosurfaktanty ograniczające własności adhezyjne bakterii oraz powodujące rozpad biofilmów korzystnie wpływają na efektywność działania antybiotyków dodawanych do produktów spożywczych.

Inne zastosowania biosurfaktantów

Wskazywana jest możliwość stosowania mikrobiologicznych ZPC podczas niektórych etapów produkcji papieru i tkanin jako czynniki stabilizujące układy dyspersyjne (w przemyśle ceramicznym i w produkcji farb) oraz jako środki czyszczące specjalnego przeznaczenia (np. do mycia precyzyjnych urządzeń, wrażliwych na działanie chemicznych detergentów [18].

Piśmiennictwo

1. Paraszkievicz K, Długoński J. Biosurfaktanty drobnoustrojowe – synteza i zastosowanie. *Biotechnologia* 2003; 4 (63): 82-91.
2. Paraszkievicz K. Biosurfactant enhancement factors in microbial degradation processes. W: Długoński J, editor. *Microbial biodegradation: from omics to function and application*. Caister Academic Press, 2016. ISBN: 978-1-910190-45-6 <http://www.horizonpress.com/biodegradation> str.167-182.

3. Desai JD, Banat IM. Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiol Molec Biol Rev* 1997; 61: 47-64.
4. Van Hamme JD, Singh A, Ward OP. Physiological aspects: Part 1 in a series of papers devoted to surfactants in microbiology and biotechnology. *Biotechnol Adv* 2006; 24: 604-620.
5. Dhanarajan G, Sen R. Amphiphilic molecules of microbial origin: classification, characteristics, genetic regulations and pathways for biosynthesis. W: Mulligan CN, Sharma SK, Mudhoo A, editors. *Biosurfactants: research trends and applications*. CRC Press Taylor & Francis Group; 2014. str. 31-48.
6. Soberón-Chávez G, Maier RM. Biosurfactants: A general overview. W: Soberón-Chávez G, editor. *Biosurfactants: from genes to applications*. Microbiology Monographs. Springer Verlag Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2011. str. 2-11.
7. Urum K, Pekdemir T, Çopur M. Screening of biosurfactants for crude oil contaminated soil washing. *J Environ Eng Sci* 2005; 4(6): 487-496.
8. Rosenberg E, Ron EZ. High- and low-molecular-mass microbial surfactants. *Appl Microbiol Biotechnol* 1999; 52: 154-162.
9. Hamley IW. Lipopeptides: from self-assembly to bioactivity. *Chem Commun (Camb)*. 2015; 21: 8574-83.
10. Łebkowska M. Biologiczne związki powierzchniowo czynne i ich zastosowanie do oczyszczania gruntów z produktów naftowych. *Biotechnologia* 2004; 1: 43-53.
11. Sotirova A, Spasova D, Vasileva-Tonkova E, Galabova D. Effects of rhamnolipid-biosurfactant on cell surface of *Pseudomonas aeruginosa*. *Microbiol Res* 2009; 164: 297-303.
12. Pacwa-Płociniczak M, Płaza GA, Piotrowska-Seget Z, Cameotra SS. Environmental applications of biosurfactants: Recent advances. *Int J Mol Sci* 2011; 12: 633-654.

13. Ongena M, Jacques P. Bacillus lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends Microbiol* 2008; 16: 15-25.
14. Raaijmakers JM, De Bruijn I, Nybroe O, Ongena M. Natural functions of lipopeptides from Bacillus and Pseudomonas: more than surfactants and antibiotics. *FEMS Microbiol Rev* 2010; 34: 1037-1062.
15. Singh AK, Dhanjal S, Cameotra SS. Surfactin restores and enhances swarming motility under heavy metal stress. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2014; 116: 26-31.
16. Van Bogaert INA, Zhang J, Soetaert W. Microbial synthesis of sophorolipids. *Proc Biochem* 2011; 46: 821-833.
17. Paraszkiwicz K, Jasińska A, Słaba M. Budowa produkcja i zastosowanie soforolipidów. *Pol J Cosmetol* 2012; 15(1): 15-20.
18. Banat IM, Franzetti A, Gandolfi I, Bestetti G, Martinotti G, Fracchia L, Smyth TJ, Marchant R. Microbial biosurfactants production, applications and future potential. *Appl Microbiol Biotechnol* 2010; 87: 427-444.
19. Bachmann RT, Johnson AC, Edyvean, RGJ. Biotechnology in the petroleum industry: An overview. *Int Biodeterior Biodegradation* 2014; 86: 225-237.
20. Sachdev DP, Cameotra SS. Biosurfactants in agriculture. *Appl Microbiol Biotechnol* 2013; 97: 1005-1016.
21. Campos JM, Stamford TL, Sarubbo LA, de Luna JM, Rufino RD, Banat IM. Microbial biosurfactants as additives for food industries. *Biotechnol Prog* 2013; 29(5): 1097-1108.
22. Bustamante M, Durán N, Diez MC. Biosurfactants are useful tools for the bioremediation of contaminated soil: a review. *J Soil Sci Plant Nutr* 2012; 12: 667-687.

23. Kanlayavattanakul M, Lourith N. Lipopeptides in cosmetics. *Int J Cosmet Sci* 2010; 32(1):1-8
24. Gharaei-Fathabad E. Biosurfactants in Pharmaceutical Industry (A Mini-Review). *American J Drug Discov Dev* 2011; 1: 58-69.
25. Fariq A, Saeed A. Production and Biomedical Applications of Probiotic Biosurfactants. *Curr Microbiol* 2016; 72(4): 489-495
26. Singh A, van Hamme JD, Ward OP. Surfactants in microbiology and biotechnology: Part 2. Applications aspects. *Biotech Adv* 2007; 25: 99-121.
27. Reis RS, Pacheco GJ, Pereira AG, Freire, DMG. Biosurfactants: production and applications. W: Chamy R, editor. *Biodegradation – Life of Science*. InTech, 2013, str. 31-61.
28. Silva RCFS, Almeida DG, Rufino RD, Luna JM, Santos VA, Sarubbo LA. Application of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. *Int J Mol Sci* 2014; 15: 12523-12542.
29. Liu JF, Mbadanga SM, Yang SZ, Gu JD, Mu BZ. Chemical structure, property and potential applications of biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* in petroleum recovery and spill mitigation. *Int J Mol Sci* 2015; 3: 4814-37.
30. Patel J, Borgohain S, Kumar M, Rangarajan V, Somasundaran P, Sen R. Recent developments in microbial enhanced oil recovery. *Renew Sust Energ Rev* 2015; 52: 1539-1558.
31. Chakraborty J, Das S. Biosurfactant-based bioremediation of toxic metals. W: Das S, editor. *Microbial Biodegradation and Bioremediation*. Elsevier, 2014, str. 167-201.
32. Mulligan CN. Enhancement of remediation technologies with biosurfactants. W: Mulligan CN, Sharma SK, Mudhoo A, editors. *Biosurfactants: research trends and applications*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2014, str. 231-276.

33. Souza EC, Vessoni-Penna TC, de Souza Oliveira RP. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. *Int Biodeterior Biodegrad* 2014; 89: 88-94.
34. Lima TM, Procópio LC, Brandão FD, Carvalho AM, Tótola MR, Borges AC. Simultaneous phenanthrene and cadmium removal from contaminated soil by a ligand/biosurfactant solution. *Biodegradation* 2011; 22: 1007-15.
35. da Rosa CFC, Freire DMG, Ferraz HC. Biosurfactant microfoam: application in the removal of pollutants from soil. *J Environ Chem Eng* 2015; 3: 89-94.
36. Rodrigues LR, Teixeira JA. Biomedical and therapeutic applications of biosurfactants. *Adv Exp Med Biol* 2010; 672: 75-87.
37. Krasowska A. Biomedyczna aktywność biosurfaktantów. *Postępy Hig Med Dośw* 2010; 64: 310-313.
38. Moryl M, Spętana M, Dziubek K, Paraszkiwicz K, Różalska S, Płaza GA, Różalski A. Antimicrobial, antiadhesive and antibiofilm potential of lipopeptides synthesised by *Bacillus subtilis*, on uropathogenic bacteria. *Acta Biochim Pol* 2015; 62: 725-32.
39. Banat IM, De Rienzo MA, Quinn GA. Microbial biofilms: biosurfactants as antibiofilm agents. *Appl Microbiol Biotechnol* 2014; 98(24): 9915-29.
40. Cameotra SS, Makkar RS. Recent applications of biosurfactants as biological and immunological molecules. *Curr Opin Microbiol* 2004; 7: 262-6.
41. Nitschke M, Costa SGV. Biosurfactants in food industry. *Trends Food Sci Technol* 2007; 18, 252-259.

Adres do korespondencji

Katarzyna Paraszekiewicz

e-mail: katarzyna.paraszekiewicz@biol.uni.lodz.pl

Katedra Mikrobiologii Przemysłowej i Biotechnologii

Instytut Mikrobiologii, Biotechnologii i Immunologii,

Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki, ul. Banacha 12/16,

90-237, Łódź,

tel. (48-42) 6354146,

fax(48-42)6655818.