

Glycolipids as alternative raw materials for environmentally sustainable automatic dishwashing detergents

Glikolipidy jako alternatywne surowce dla zrównoważonych środowiskowo preparatów do automatycznego mycia naczyń

DOI: 10.15199/62.2024.7.5

A review, with 57 refs., of the use of rhamnolipids and sophorolipids as surfactants of microbial origin in dishwashing preparations. The structure of these compds. was presented and their phys. chem. properties were characterized. The benefits of using biosurfactants in automatic dishwasher products in terms of environmental sustainability were discussed.

Keywords: household chemicals, biosurfactant, glycolipid, sophorolipid, rhamnolipid, automatic dishwashing detergent

Związki powierzchniowo czynne (ZPC), potocznie nazywane surfaktantami, to grupa substancji, których specyficzne właściwości wynikają z ich struktury chemicznej. Cząsteczki ZPC charakteryzuje amfifilowa budowa, składają się z dwóch fragmentów o różnej polarności: części hydrofilowej i części hydrofobowej^{1, 2}). W klasycznych surfaktantach grupą hydrofilową jest najczęściej reszta kwasowa lub zasadowa zapewniająca rozpuszczalność w wodzie, a część hydrofobową (lipofilową) stanowi zwykle alifatyczny łańcuch węglowodorowy (zawierający z reguły 8–18 atomów węgla)³). Dzięki swej charakterystycznej budowie cząsteczki surfaktantów gromadzą się na

Przedstawiono przegląd literaturowy dotyczący glikolipidów jako alternatywnych surowców do zastosowania w zrównoważonych środowiskowo preparatach do automatycznego mycia naczyń. W ostatnim czasie rhamnolipidy i soforolipidy, jako klasa surfaktantów otrzymywanych w procesach biotechnologicznych, cieszą się rosnącym zainteresowaniem w branży detergentowej. Przedstawiono charakterystyki związków oraz podano ich kluczowe właściwości. Szczególną uwagę zwrócono na korzyści wynikające ze stosowania biosurfaktantów w produktach chemii gospodarczej.

Słowa kluczowe: chemia gospodarcza, biosurfaktant, glikolipid, soforolipid, rhamnolipid, detergent do automatycznego mycia naczyń

powierzchni rozdziału faz i wywierają wpływ na właściwości powierzchniowe cieczy, w których są rozpuszczone, nawet przy bardzo małych stężeniach^{4, 5}).

Większość obecnie stosowanych związków powierzchniowo czynnych bazuje na surowcach nieodnawialnych, głównie ropie naftowej. Ich powszechność wynika z niskich kosztów produkcji, długiego okresu przydatności do użycia, dostępności i skutecznego działania, nawet w niskich temperaturach. Rosnące zainteresowanie konsumentów produktami bezpiecznymi dla użytkownika i środowiska doprowadziło do poszukiwania „zielonych związków powierzchniowo czynnych”. Biosurfaktanty produkowane



Mgr inż. Damian LISOWSKI (ORCID: 0000-0001-5397-9855) w roku 2011 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej, specjalność inżynieria chemiczna i bioprosesowa. Od października 2022 r. jest doktorantem w Szkole Doktorskiej Politechniki Krakowskiej, gdzie realizuje pracę badawczą w ramach VI edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy”. Jest kierownikiem laboratorium badawczo-rozwojowego i kontroli jakości w Z.Ch.G. „Pollena-Astra” sp. z o.o. w Przemysłu. Specjalność – tworzenie nowych formułacji oraz wprowadzanie do obrotu detergentów do zastosowań konsumenckich, przemysłowych i instytucjonalnych.



Dr hab. inż. Elżbieta SIKORA, prof. PK (ORCID: 0000-0003-4867-965X), w roku 1992 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej. W 1998 r. uzyskała stopień doktora na tej samej uczelni. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelni na macierzystym wydziale. Od 2021 r. kieruje Katedrą Chemii i Technologii Organicznej. Jej zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z pozyskiwaniem, badaniem właściwości oraz zastosowaniem surowców naturalnego pochodzenia w produktach kosmetycznych i produktach chemii gospodarczej. Realizuje badania dotyczące zjawisk zachodzących w układach wielofazowych: emulsjach, żelach, nośnikach substancji aktywnych, takich jak liposomy, mikrokapułki polimerowe czy nanocząstki lipidowe. Specjalność – lekka technologia chemiczna, procesy katalityczne.

*** Adres do korespondencji:**

Zakład Chemii Gospodarczej „Pollena-Astra” sp. z o.o., ul. Herburtów 34, 37-700 Przemysł, tel.: (16) 309-14-02, e-mail: damian.lisowski@doktorant.pk.edu.pl

**** Adres do korespondencji:**

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: (12) 628-27-41, e-mail: elzbieta.sikora@pk.edu.pl

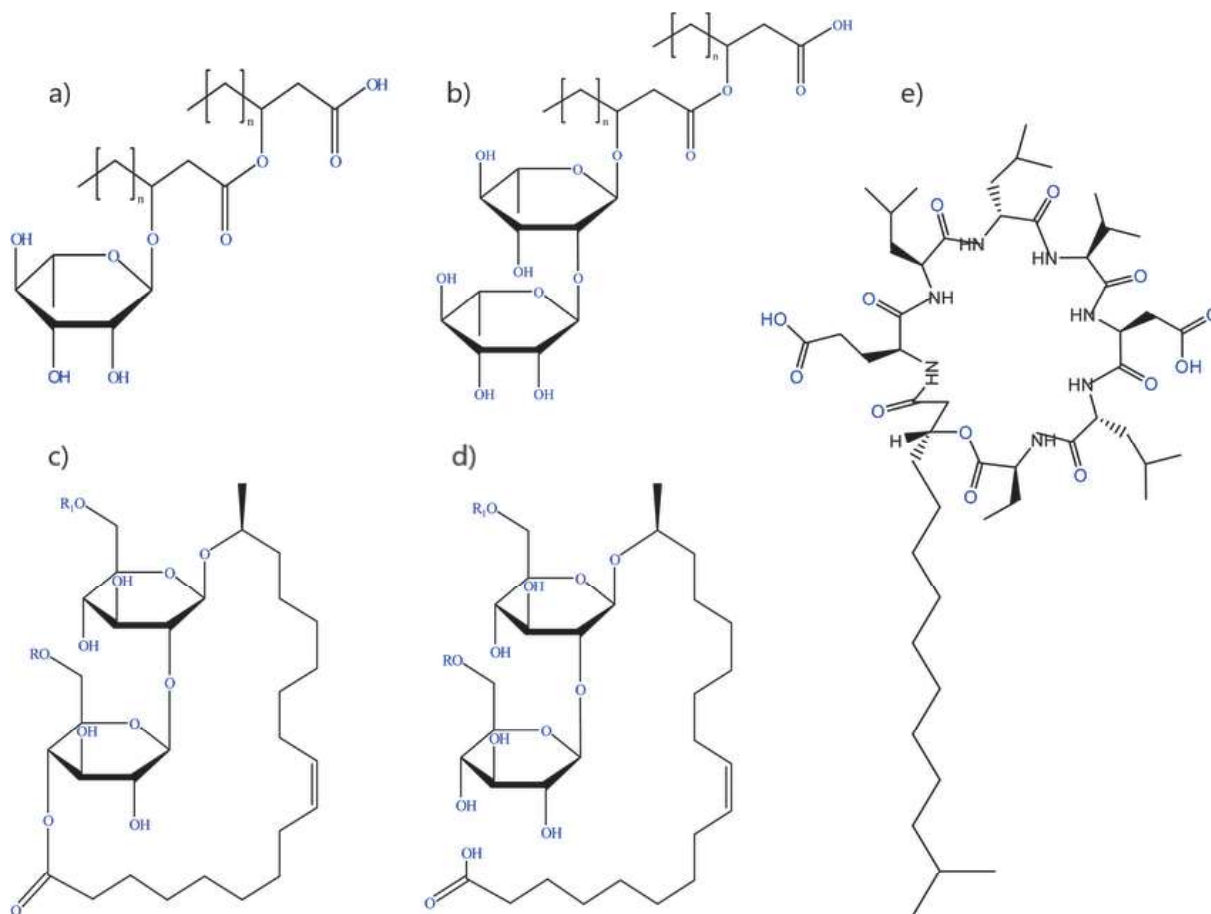


Fig. 1. Chemical structures of biosurfactants: a) monoramnolipid, b) diramnolipid, c) lactonic sophorolipid, d) acidic sophorolipid, e) surfactin¹⁰

Rys. 1. Struktury chemiczne biosurfaktantów: a) monoramnolipid, b) diramnolipid, c) soforolipid laktonowy, d) soforolipid kwaśny, e) surfaktyna¹⁰

przez mikroorganizmy zyskują na popularności i są postrzegane jako przełom w zastępowaniu syntetycznych związków powierzchniowo czynnych⁶). W 2023 r. wartość globalnego rynku tych substancji została oszacowana na 4,42 mld USD, a przy zakładanej rocznej stopie wzrostu wynoszącej 5,4% do 2030 r. osiągnie wartość 6,69 mld USD, z czego 30–35% będzie udziałem rynku europejskiego⁷).

W pracy omówiono właściwości oraz praktyczne zastosowania glikolipidów, wybranej grupy biosurfaktantów, w środkach do automatycznego mycia naczyń. Analizie poddano zarówno zalety (biodegradowalność, mała toksyczność i duża dostępność surowców), jak i wady (wysoka cena, mała skala produkcji) glikolipidów.

Nowa generacja substancji powierzchniowo czynnych

W produkcji środków powierzchniowo czynnych za główny udział emisji ditlenku węgla (CO₂), a tym samym znaczną część śladu węglowego produktów odpowiadają metody i źródła pozyskiwania surowców. Dlatego też, aby zminimalizować ślad węglowy i wesprzeć branżę detergentową w osiągnięciu celów neutralności pod względem emisji CO₂, należy poszukiwać surowców naturalnych lub pochodzących z procesów opartych na obiegu zamkniętym.

Każda zmiana sposobu pozyskiwania surowców wymaga holistycznego podejścia, zapewnienia, że osiągnięte zmniejszenie śladu węglowego nie nastąpi kosztem negatywnego wpływu na globalne ekosystemy⁸).

Rozpatrywane przejście od zastosowania produktów petrochemicznych do wykorzystania materiałów odnawialnych jako źródła surowców wyjściowych do syntezy surfaktantów wpisuje się zatem w koncepcję zrównoważonego rozwoju. Otrzymana w ten sposób nowa kategoria biodegradowalnych surowców ma szansę zaspokoić rosnące zapotrzebowanie konsumentów na detergenty mniej szkodliwe dla środowiska, ale równie skuteczne jak ich konwencjonalne odpowiedniki.

Biosurfaktanty pierwszej generacji to substancje ekstrahowane z surowców pochodzenia zwierzęcego, roślinnego lub otrzymywane w wyniku bezpośredniej syntezy chemicznej. Do ich produkcji można wykorzystywać i modyfikować różne surowce, takie jak triglicerydy, węglowodany, a także niektóre kwasy organiczne (wytwarzane w procesie fermentacji⁹). Przykładem tego typu ZPC są saponiny i alkilopoliglukozydy.

Na szczególną uwagę zasługują biosurfaktanty drugiej generacji, czyli te, do otrzymywania których wykorzystuje się mikroorganizmy (m.in. bakterie, drożdże i grzyby). Procesy biologiczne (biokataliza lub fermentacja) rów-

niez stanowią metody wytwarzania związków powierzchniowo czynnych. Z mieszaniny poreakcyjnej ekstrahuje się i oczyszcza pożądany produkt, np. glikolipidy, szczególnie ramnolipidy i soforolipidy, oraz lipopeptydy, np. surfaktynę⁹⁾. Na rys. 1 przedstawiono wybrane struktury biosurfaktantów. Wymienione surowce są coraz chętniej stosowane w produktach chemii gospodarczej.

Charakterystyka glikolipidów

Biosurfaktanty otrzymywane w procesach syntezy mikrobiologicznej można podzielić na dwie zasadnicze grupy^{11, 12)}: (i) związki o stosunkowo małej masie cząsteczkowej, do których zalicza się glikolipidy, lipopeptydy, fosfolipidy oraz neutralne lipidy, i (ii) substancje wielcząsteczkowe, wśród których przeważają związki polimerowe oraz tzw. specyficzne biosurfaktanty.

Najszerzej badaną grupą biosurfaktantów o małej masie cząsteczkowej są glikolipidy. Ich struktura składa się z hydrofilowej reszty węglowodanowej połączonej z hydrofobowymi łańcuchami kwasów tłuszczowych o różnej długości poprzez grupę estrową¹³⁾. Biosurfaktanty glikolipidowe są dalej charakteryzowane na podstawie struktury hydrofilowej reszty węglowodanowej, którą zawierają, przy czym najbardziej rozpowszechnionymi podklasami są ramnolipidy, soforolipidy, trehalolipidy i lipidy mannozylo-erytrytolowe¹⁴⁾.

Ramnolipidy składają się z jednego lub dwóch kwasów tłuszczowych o długości łańcucha zawierającego 8–16 atomów węgla połączonych z jedną lub dwiema cząsteczkami cukru, ramnozy¹³⁾. Do ich produkcji wykorzystywana jest głównie bakteria Gram-ujemna *Pseudomonas aeruginosa*^{15–17)}. Dalsze badania wykazały, że również inne gatunki bakterii aktywnie wytwarzają biosurfaktanty ramnolipidowe (tabela 1)^{18–20, 28–31)}. Rodzaj wytwarzanych ramnolipidów zależy od użytego szczepu, źródła węgla i warunków hodowli. Ramnolipidy stanowią jedną z najciekawszych klas biosurfaktantów ze względu na swoje korzystne właściwości. Jako odpowiednie źródła węgla uznano kilka odnawialnych substratów, takich jak zużyte oleje i odpady z przemysłu spożywczego. Ramnolipidy mogą zmniejszać napięcie powierzchniowe woda/powietrze z 72 mN/m do wartości bliskich 30 mN/m, a także napięcie na granicy faz woda/olej z 43 mN/m do wartości ok. 1 mN/m. Krytyczne stężenie micelarne (CMC) czystych ramnolipidów i ich mieszanin zależy w dużym stopniu od składu chemicznego poszczególnych gatunków i waha się w granicach 50–200 mg/L³²⁾.

Soforolipidy składają się z hydrofilowego disacharydu soforozy, który złożony jest z dwóch monomerów połączonych wiązaniami β -1,2, połączonego wiązaniem

Table 1. Examples of microorganisms used to produce glycolipids

Tabela 1. Przykładowe mikroorganizmy wykorzystywane do produkcji glikolipidów

Rodzaj glikolipidów	Mikroorganizmy	Źródło
Ramnolipidy	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	15–17
	<i>Pseudomonas cepacia</i>	18
	<i>Pseudomonas</i> ssp.	19
	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	20
Soforolipidy	<i>Candida sphaerica</i>	21
	<i>Starmerella bombicola</i>	22, 23
	<i>Cutaneotrichosporon mucoides</i>	24
Trehalolipidy	<i>Nocardia farcinica</i>	25
	<i>Rhodococcus</i> sp.	26
Lipidy mannozylo-erytrytolowe	<i>Pseudozyma aphidis</i>	27

Table 2. Selected physicochemical properties of commercial glycolipids from Evonik⁴¹⁾

Tabela 2. Wybrane właściwości fizykochemiczne handlowych glikolipidów firmy Evonik⁴¹⁾

Nazwa handlowa	rewoferm [®] SL One	rewoferm [®] RL 100
Rodzaj glikolipidu	soforolipid	ramnolipid
Wygląd	jasnożółta ciecz	żółta ciecz
Kompatybilność recepturalna	anionowe, kationowe, niejonowe i amfoteryczne związki powierzchniowo czynne	anionowe, niejonowe i amfoteryczne związki powierzchniowo czynne
Rozpuszczalność	rozpuszczalny w wodzie przy pH > 4	rozpuszczalny w wodzie przy pH > 5
Dyspergowalność	dyspergowalny w wodzie przy pH < 4	-
Zawartość substancji aktywnej	~45%	~50%
Stabilność	przy pH 5–8	przy pH 5,5–11
Przetwarzanie	na zimno	na zimno
Napięcie powierzchniowe	38 mN/m	pH 5,5: 28 mN/m pH 9,0: 34 mN/m
Krytyczne stężenie micelarne (CMC)	pH 5: 0,02 g/L	pH 5,5: 0,02 g/L pH 9,0: 0,04 g/L

glikozydowym z hydroksylowanymi łańcuchami kwasów tłuszczowych C16 lub C18, które mogą być acetylowane lub nieacetylowane^{33, 34)}. Kongenery soforolipidów występują w postaci laktonowej lub kwasowej, przy czym każda postać ma inne zastosowanie. Soforolipidy są syntetyzowane przez drożdże, takie jak *Starmerella bombicola*^{22, 23, 34)}. Napięcie powierzchniowe tych biomolekuł może osiągać wartości ok. 33 mN/m, a napięcie międzyfazowe pomiędzy *n*-heksadekanem i wodą wynosi 5 mN/m. Drożdże *Starmerella bombicola* uznawane są za jedno z najbardziej produktywnych szczepów, w obecności których osiągane są wydajności soforolipidów średnio 300 g/L^{35, 36)}.

Obecnie to ramnolipidy i soforolipidy stanowią klasę mikrobiologicznych biosurfaktantów, dla których osiągnięto największy postęp w kierunku ich zastosowania komercyjnego w branży detergentowej, w tym środkach do mycia naczyń. Potencjalnymi dostawcami surowców w Europie

są firmy Evonik, Givaudan, Holiferm oraz Solvay^{37–40}. Właściwości wybranych glikolipidów oferowanych na rynku przedstawiono w tabeli 2.

Trehalolipidy zawierają disacharyd trehalozy związany z kwasem tłuszczowym (kwasem mykolowym), charakteryzują się dużą różnorodnością strukturalną i są wytwarzane głównie przez gatunki z rodzajów *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Mycobacterium* i *Corynebacterium*^{25, 26, 33}. Trehalolipidy z *Arthrobacter* spp. i *Rhodococcus erythropolis* są w stanie obniżyć napięcie powierzchniowe i międzyfazowe w bulionie hodowlanym odpowiednio do 25–40 i 1–5 mN/m³²).

Lipidy mannozylo-erytrytolowe również należą do obiecujących biosurfaktantów, są produkowane z olejów roślinnych przez *Pseudozyma antarctica* i *Pseudozyma aphidis*^{27, 42}. Charakteryzują się obecnością cukru mannozowego połączonego z kwasem tłuszczowym i są podzielone ze względu na długość łańcucha hydrofobowego kwasu tłuszczowego oraz stopień nasycenia i/lub acetylacji w pozycjach C4 i C6 monosacharydu⁴²).

Zrównoważone środowiskowo środki do automatycznego mycia naczyń

W ostatnich latach w zmywaniu automatycznym naczyń obserwuje się tendencje proekologiczne. Dąży się do obniżania temperatury procesu mycia, minimalizacji zużycia wody oraz detergentów w cyklach myjących. Dobry detergent do zmywarek musi skutecznie zmniejszać napięcie powierzchniowe, aby umożliwić łatwe usuwanie zabrudzeń, wydajnie „pracować” nawet w twardej wodzie, minimalizować plamy po wodzie oraz zmniejszać korozję szkła i metalu⁴³).

Surfaktanty wytwarzane biotechnologicznie wykazują typowe właściwości powierzchniowo czynne, a ponadto zapewniają liczne korzyści w zakresie równowagi środowiskowej (rys. 2). W preparatach myjących mogą pełnić zarówno rolę emulgatorów, rozpuszczalników, czynników zwilżających, jak i regulujących lepkość. W odróżnieniu jednak od ich odpowiedników syntetycznych cechują się mniejszą toksycznością, większą biodegradowalnością, lepszą środowiskową kompatybilnością i dobrą stabilnością przy ekstremalnych



Fig. 2. Environmental sustainability benefits of using biosurfactants in automatic dishwashing detergents^{44–46}

Rys. 2. Korzyści stosowania biosurfaktantów w środkach do automatycznego mycia naczyń w zakresie równowagi środowiskowej^{44–46}

wartościach pH, temperatury i zasolenia środowiska^{47–49}). Ponadto surfaktanty pochodzenia biologicznego wykazują stosunkowo niskie wartości krytycznego stężenia micelnego oraz wysoką skuteczność solubilizacji⁵⁰).

Na rys. 3 przedstawiono proces otrzymywania środków czyszczących na bazie surowców odnawialnych. W preparatach do ręcznego mycia naczyń zastosowanie znajdują wysokopienne ramnolipidy. Natomiast w preparatach do maszynowego mycia naczyń preferowane są soforolipidy,

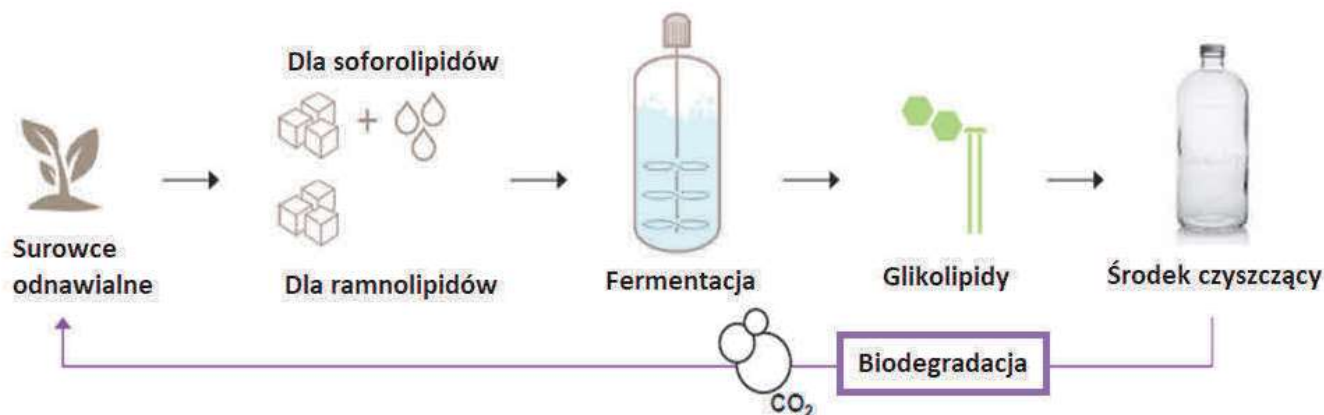


Fig. 3. The process of obtaining cleaning products based on renewable raw materials⁵¹

Rys. 3. Proces otrzymywania środków czyszczących na bazie surowców odnawialnych⁵¹

wykazujące równie dobrą zdolność usuwania tłuszczu oraz wymaganą przy myciu maszynowym zdolność do szybkiego wygaszania piany zarówno w cieplej, jak i zimnej wodzie⁵¹).

Przykład zastosowania soforolipidów w środku myjącym ujawnia patent firmy Saraya Co., Ltd.^{52, 53}. Opisany wynalazek dotyczy biodegradowalnej, niskopiennej kompozycji detergentowej, charakteryzującej się wysoką zdolnością czyszczenia w szerokim zakresie temperatur. Przedstawiona formuła stanowi mieszaninę soforolipidu typu laktonowego i soforolipidu typu kwasowego w stosunku 35:65–90:10. Objęta ochroną patentową kompozycja może ponadto zawierać składniki pomocnicze, takie jak enzymy, tlenowe środki wybielające, aktywatory wybielania, alkaliczne wypełniacze aktywne, środki sekwestrujące, modyfikator lepkości i obojętne sole nieorganiczne.

Podsumowanie

Produkcja biosurfaktantów na dużą skalę jest złożona i trudna, przez co nadal nieopłacalna ekonomicznie. Wiele grup badawczych koncentruje się obecnie na znalezieniu bardziej opłacalnych sposobów produkcji poprzez wykorzystanie łatwo dostępnych i odnawialnych zasobów biologicznych jako surowców podstawowych. Metody biotechnologiczne wymagane przy syntezie biosurfaktantów są dość kosztowne, a ich oczyszczanie dość trudne⁵⁴).

Chociaż problemy te są powodem do niepokoju, nastąpił znaczny wzrost różnorodności procesów produkcyjnych tych ekologicznych związków powierzchniowo czynnych. Wysoka biodegradowalność, mniejsza toksyczność i większa dostępność surowców to niewątpliwie korzyści, które sprawiają, że potentaci chemiczni i koncerny inwestują znaczne środki finansowe w badania i rozwój tych produktów i wprowadzają je na rynek^{55–57}).

W nadchodzących latach może nastąpić ograniczenie lub nawet całkowite wycofywanie związków powierzchniowo czynnych na bazie ropy naftowej, co przekłada się na konieczność opracowania nowszych, bardziej ekologicznych i zrównoważonych środków do automatycznego mycia naczyń.

Otrzymano: 31-05-2024

LITERATURA

- [1] E. Liang, M.N. Rosenblatt, P.S. Ajnami, J.A. Hughens, *Eur. J. Pharm. Sci.* 2000, **11**, 199.
- [2] M. Schwarze, *Chem. Ing. Tech.* 2021, **93**, 1.
- [3] R. Zieliński, *Surfaktanty. Budowa, właściwości, zastosowania*, Wyd. Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań 2013.
- [4] J. Przondo, *Związki powierzchniowo czynne i ich zastosowanie w produktach chemii gospodarczej*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2007.
- [5] J. Ogonowski, A. Tomaszewicz-Potępa, *Związki powierzchniowo czynne. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 1999.
- [6] S.V. Nagtode, C. Cardoza, H.K.A. Yasin, S.N. Mali, S.M. Tambe, P. Roy, K. Singh, A. Goel, P.D. Amin, B.R. Thorat, N. Jorddy, J.N. Cruz, A.P. Pratap, *ACS Omega* 2023, **8**, 11674.
- [7] <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-microbial-biosurfactants-market-2/55533/>, dostęp 24.05.2024 r.
- [8] <https://www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/zrownowazone-projektowanie-procesow-produkcji-surowcow-detergentowych>, dostęp 24.05.2024 r.
- [9] S. Rebello, A.K. Asok, S. Mundayoor, M.S. Jisha, *Environ. Chem. Lett.* 2014, **12**, nr 2, 275.
- [10] W. Begum, S. Bidyut, M. Ujjwal, *RSC Advances* 2023, **13**, 25601.
- [11] E.Z. Ron, E. Rosenberg, *Environ. Microbiol.* 2001, **3**, 229.
- [12] E. Rosenberg, E.Z. Ron, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1999, **52**, 154.
- [13] A.M. Abdel-Mawgoud, F. L'epine, E. D'eziel, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010, **86**, 1323.
- [14] L.A. Sarubbo, M.G.C. Silva, I.J.B. Durval, K.G.O. Bezerra, B.G. Ribeiro, I.A. Silva, M.S. Twigg, I.M. Banat, *Biochem. Eng. J.* 2022, **181**, 108377.
- [15] L. Silva, R.B. Lovaglio, R.F. Costa Marques, M. Jafelicci Jr., J. Contiero, *Colloids Surf. B Biointerfaces* 2021, **205**, 111883.
- [16] J.R. De Sousa, J.A. Da Costa Correia, J.G.L. De Almeida, S. Rodrigues, O.D.L. Pessoa, V.M.M. Melo, L.R.B. Goncalves, *Process Biochem.* 2011, **46**, 1831.
- [17] C.E. de Araújo Padilha, C. da Costa Nogueira, D.F. de Santana Souza, J.A. de Oliveira, E.S. dos Santos, *Ind. Crops Prod.* 2019, **140**, 111604.
- [18] R. Silva, D. Almeida, R. Rufino, J. Luna, V. Santos, L. Sarubbo, *Int. J. Mol. Sci.* 2014, **15**, 12523.
- [19] M. Hassan, T. Essam, A.S. Yassin, A. Salama, *Int. J. Biol. Macromol.* 2016, **82**, 573.
- [20] V.K. Gaur, A. Bajaj, R.K. Regar, M. Kamthan, R.R. Jha, J.K. Srivastava, N. Manickam, *Bioresour. Technol.* 2019, **272**, 19.
- [21] J.M. Luna, R.D. Rufino, C.D.C. Albuquerque, L.A. Sarubbo, G.M. Campos Takaki, *Int. J. Mol. Sci.* 2011, **12**, 2463.
- [22] Z. Liu, X. Tian, Y. Chen, Y. Lin, A. Mohsin, J. Chu, *Process Biochem.* 2019, **81**, 1.
- [23] C.P. Kurtzman, N.P.J. Price, K.J. Ray, T.-M. Kuo, *FEMS Microbiol. Lett.* 2010, **311**, 140.
- [24] P.R.F. Marcelino, G.F.D. Peres, R. Ter'an-Hilares, F.C. Pagnocca, C.A. Rosa, T.M. Lacerda, J.C. dos Santos, S.S. da Silva, *Ind. Crops Prod.* 2019, **129**, 212.
- [25] N. Christova, S. Lang, V. Wray, K. Kaloyanov, S. Konstantinov, I. Stoineva, *J. Microbiol. Biotechnol.* 2015, **25**, 439.
- [26] M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina, T.A. Baeva, O.A. Kochina, S.V. Gein, V.A. Chereshev, *New Biotechnol.* 2015, **32**, 559.
- [27] Y. Niu, J. Wu, W. Wang, Q. Chen, *Food Sci. Nutr.* 2019, **7**, 937.
- [28] E. Deziel, F. L'epine, D. Dennie, D. Boismenu, O.A. Mamer, R. Villemur, *Biochim. Biophys. Acta Mol. Cell Biol. Lipids* 1999, **1440**, 244.
- [29] D. Dubeau, E. D'eziel, D.E. Woods, F. L'epine, *BMC Microbiol.* 2009, **9**, 263.
- [30] L. Tripathi, M.S. Twigg, A. Zompra, K. Salek, V.U. Irorere, T. Gutierrez, G.A. Spyroulias, R. Marchant, I.M. Banat, *Microb. Cell Fact.* 2019, **18**, 164.
- [31] M.S. Twigg, L. Tripathi, A. Zompra, K. Salek, V.U. Irorere, T. Gutierrez, G.A. Spyroulias, R. Marchant, I.M. Banat, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018, **102**, 8537.
- [32] D.K.F. Santos, R.D. Rufino, J.M. Luna, V.A. Santos, L.A. Sarubbo, *Int. J. Mol. Sci.* 2016, **17**, 1.
- [33] G. Rawat, A. Dhasmana, V. Kumar, *Environ. Sustain.* 2020, **3**, 353.
- [34] I.N.A. Van Bogaert, K. Saerens, C. De Mynck, D. Develter, W. Soetaert, E.J. Vandamme, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2007, **76**, 23.
- [35] H. Wang, S.L. Roelants, M.H. To, R.D. Patria, G. Kaur, N.S. Lau, C.Y. Lau, I.N. Van Bogaert, W. Soetaert, C.S. Lin, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2019, **94**, 999.
- [36] D. Fei, G.W. Zhou, Z.Q. Yu, H.Z. Gang, J.F. Liu, S.Z. Yang, R.Q. Ye, B.Z. Mu, *J. Surfactants Deterg.* 2020, **23**, 109.
- [37] <https://www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/evonik-rozwija-produkcje-biosurfaktantow-glikolipidowych>, dostęp 2.05.2024 r.
- [38] <https://www.givaudan.com/fragrance-beauty/active-beauty/products>, dostęp 25.05.2024 r.
- [39] <https://holiferm.com/products/>, dostęp 25.05.2024 r.
- [40] <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-launches-new-biosurfactants-carbon-neutral-and-circular-beauty-care-products>, dostęp 25.05.2024 r.
- [41] <https://www.ulprospector.com/knowledge/media/2021/11/evonik-presentation-12-02-21.pdf>, dostęp 2.05.2024 r.
- [42] B.G. Ribeiro, J.M.C. Guerra, L.A. Sarubbo, *Biotechnol. Prog.* 2020, **36**, 1.
- [43] H. Hauthal, [w:] *Handbook of detergents*, Part C, CRC Press, Boca Raton 2004.
- [44] S.A. Qamar, S. Pacifico, *J. Environ. Chem. Eng.* 2023, **11**, 111555.
- [45] A. Karnwal, S. Shrivastava, A.R.M.S. Al-Tawaha, G. Kumar, R. Singh, A. Kumar, A. Mohan, Yogita, T. Malik, *Biomed. Res. Int.* 2023, 2375223.
- [46] C.L. Mgbachidinma, O.D. Akan, C. Zhang, M. Huang, N. Linus, H. Zhu, S.M. Wakil, *Bioresour. Technol.* 2022, **364**, 128021.
- [47] S. Mukherjee, P. Das, R. Sen, *Trends Biotechnol.* 2006, **24**, nr 11, 509.
- [48] P. Singh, S. Cameotra, *Trends Biotechnol.* 2004, **22**, nr 3, 142.
- [49] J. Krzyczkowska, E. Białecka-Florjańczyk, *Zywn. Nauk. Technol. Jak.* 2012, **4**, nr 83, 5.
- [50] E. Ławniczak, K. Czaczky, M. Owsianiak, Ł. Chrzanowski, *Post. Microbiol.* 2011, **50**, nr 1, 17.
- [51] <https://household-care.evonik.com/en/products/biosurfactants>, dostęp 2.05.2024 r.
- [52] *Pat. jap.* 2003013093A (2003).
- [53] *Pat. WO* 2003002700A1 (2003).
- [54] L.A. Sarubbo, M.D.G.C. Silva, I.J.B. Durval, K.G.O. Bezerra, B.G. Ribeiro, I.A. Silva, M.S. Twigg, I.M. Banat, *Biochem. Eng. J.* 2022, **181**, 108377.
- [55] <https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-signs-exclusive-agreement-with-locus.html>, dostęp 2.05.2024 r.
- [56] <https://www.unilever.com/news/news-search/2022/building-a-clean-green-foam-production-machine/>, dostęp 2.05.2024 r.
- [57] <https://www.igb.fraunhofer.de/en/research/industrial-biotechnology/bio-process-engineering/optimization-and-scale-up-of-fermentative-production-of-chemicals/biosurfactants-production-and-optimization.html>, dostęp 2.05.2024 r.