



dr hab. Maciej Guzik

Ukończył Uniwersytet Jagielloński w Krakowie z tytułem magistra ochrony środowiska w 2008 roku. Następnie podjął studia doktoranckie na University College Dublin w Irlandii. W tym czasie wyspecjalizował się w rozwoju fermentacji o wysokiej gęstości komórkowej, przetwarzaniu polihydroksyalkanianów (PHA), a także manipulacji genetycznej bakterii. W 2012 roku przedstawił rozprawę doktorską zatytułowaną *Konwersja polietylenu pochodzącego od konsumentów do biodegradowalnego polimeru polihydroksyalkanianu*. W kolejnych latach pracował w firmie spin-out UCD Bioplastech, gdzie zajmował się rozwojem strategii fermentacyjnych do produkcji PHA. Był również liderem projektu mającego na celu produkcję małych molekuł powstających z PHA. W 2015 roku wrócił do Krakowa, swojego rodzinnego miasta, i rozpoczął pracę w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. J. Habera Polskiej Akademii Nauk. W 2021 roku uzyskał stopień doktora habilitowanego w chemii. Intensywnie prowadzi badania związane z biopolimerami.

3 Bioplastiki zapożyczone ze świata mikrobow

biotworzywa

bioplastiki

bakteryjna celuloza

polilaktyd

druk 3D

Natura jest przeogromną kopalnią różnorodnych materiałów, w tym polimerów produkowanych przez mikroorganizmy. Część z tych wytworów z powodzeniem może być wykorzystywana jako zamienniki tradycyjnych plastików. Mikroby przychodzą z pomocą przy wytwarzaniu substytutów styropianu, sztucznej skóry czy polimerów używanych do produkcji butelek, reklamówek i innych jednorazowych opakowań.

Wstęp

Otoczające nas środowisko to ogromny magazyn materiałów o różnorodnych właściwościach. Jako gatunek wyspecjalizowaliśmy się w ich wydobyciu i przetwórstwie. Dzięki temu na przestrzeni ostatnich dekad ludzkość dokonała niesamowitego skoku, a nadchodzące dziesięciolecia zaprowadzą nas z pewnością jeszcze dalej. Oczywiście jest to okupione wysoką ceną, jaką przyszło nam płacić za nierozważne zarządzanie zasobami. Najjaskrawszym przykładem są tworzywa sztuczne, które w ostatnich latach stały się przytłaczającym problemem, a to tylko przez nierozsądek ich stosowania. Niemniej nikt nie potrafi sobie wyobrazić życia bez polimerów, pojawiają się dosłownie wszędzie, a bez nich nasze życie byłoby ogromnie trudne – są w autach, odzieży, materiałach codziennego użytku. W większości przypadków używane są raz i przez krótki okres, a to powoduje, że stały się realnym zagrożeniem dla zdrowia całej planety. Objawia się ono istnieniem żeglującej po oceanach wyspy śmieci wielkości Francji, foliówkami zabijającymi tysiące organizmów wodnych, lądowych i powietrznych, czy w końcu mikroplastikiem, obecnym w naszym jedzeniu, wdychanym powietrzu... Ale czy istnieje jakaś alternatywa dla tworzyw sztucznych? Odpowiedź jest prosta – tak. Dla większości tradycyjnych polimerów istnieją zamienniki na wyciągnięcie ręki. Na nowo uczymy się odkrywać

dobrodziejstwa skrywające się w szeroko pojętej biomase. Jednak należy mieć na uwadze, że czerpanie z tych zasobów musi odbywać się w sposób zrównoważony. W artykule przedstawię kilka alternatyw dla tradycyjnych polimerów oferowanych przez mikroorganizmy, przybliżę, na jakim jesteśmy etapie w ich produkcji, gdzie są obecnie stosowane, i wskażę, jaki jest ich potencjał.

Grzybowy styropian

Wspomniałem o zrównoważonym podejściu do wykorzystywania zasobów naturalnych. Doskonałym przykładem są technologie, które pozwalają przerobić odpad w coś wartościowego. W 2007 roku w Stanach Zjednoczonych powstała mała firma Ecovative, którą założyła dwójka kolegów z uczelni: Eben Bayer i Gavin McIntyre¹. Panowie wpadli na pomysł wykorzystania grzybni w produkcji materiałów izolacyjnych dla budownictwa. Na przestrzeni lat udoskonalili swoją technologię, która obecnie zarobiła już dla właścicieli ponad 70 milionów dolarów. Firma wykorzystuje odpady przemysłu agro do uprawy grzybni. Grzybnia ta w połączeniu z odpadami celulozowymi ma właściwości bardzo zbliżone do powszechnie stosowanego styropianu – spienionego polistyrenu (il. 1). Proces produkcji nie jest zbyt skomplikowany, a prowadzi do szerokiej gamy wyrobów. Najpierw projektowane są w CAD-zie formy użytkowe, następnie za pomocą obrabiarek CNC (Computerized Numerical Control) wykrawa się odpowiednie kształty w płytach MDF. Kolejnym krokiem jest odwzorowanie matrycy MDF-owej poprzez termoformowanie pochodnej polimeru PET. Do tak przygotowanych wzorników wsypuje się agroodpady połączone z grzybnią, która wzrasta przez następnych kilka dni, formując prawie docelowy wyrób. Ostatnim krokiem procesu jest wysuszenie formy, która nadaje się już do użytku. Jediną wadą, jaką widzę, jest właśnie czas potrzebny na wyhodowanie odpowiedniej formy. Może się on okazać kluczowym problemem przy komercjalizacji rozwiązania. Materiał jest w 100% biodegradowalny, więc z powodzeniem po użyciu może znaleźć się w kompoście, który zasili w dodatkowe substancje odżywcze. Może być stosowany nie tylko jako materiał izolacyjny czy opakowaniowy, ale również jako wypełnienie piankowe w plecakach, obuwiu czy rękawicach, jako materiał dla ekodizajnu (na przykład w produkcji lamp, jak to miało miejsce przy współpracy z IKEA).

Il. 1. Biodegradowalne opakowanie na wino wykonane z agroodpadów i grzybni za pomocą technologii ecovative, źródło: Mycobond, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons



Skóra z bakterii

Niezmiernie interesującym polimerem jest celuloza, produkowana głównie przez rośliny. Wykorzystywana jest w setkach ton dziennie do produkcji papieru i kartonu. Ostatnio na rynkach pojawiły się sztuce na jej bazie, a jednorazową papierową zastawę stosujemy już długo. Jednak celuloza nie ma właściwości zbliżonych do tradycyjnych polimerów petrochemicznych. Czyżby? Ta drzewna na pewno nie, ale za to ta wytwarzana przez mikroorganizmy już tak. Wielu pewnie próbowało kombuczy – sfermentowanej herbaty. Jej specyficzny smak i właściwości prozdrowotne tkwią właśnie w procesie fermentacji z użyciem SCOBY, czyli „grzybka herbacianego”. Pod tą mylącą nazwą kryje się konsorcjum bakterii i drożdżaków, które produkują w późnych etapach fermentacji swoisty kożuch. Twór ten jest polimerem czystej celulozy przeplecionej białkami, który ma znacząco inne właściwości fizykochemiczne i mechaniczne niż ta pozyskiwana z roślin². Po wysuszeniu tworzy materiał, który jest wytrzymały i elastyczny, organoleptycznie przypomina skórę. Problemатyczna jest hodowla wielkoskalowa – bakteryjna celuloza wytwarzana jest na powierzchni hodowli stacjonarnej – ilość, jaką można otrzymać, jest wprost proporcjonalna do powierzchni, jaką zajmuje naczynie hodowlane. Materiał ten można za to łatwo barwić, ciąć, szyć i formować w wyroby kaletnicze (il. 2, 3). Jest jeszcze na etapie doskonalenia, więc cierpi na choroby wieku dziecięcego. Innymi słowy, trzeba modyfikować sam polimer, aby spełniał oczekiwania konsumentów. Poprzez domieszkowanie innych biopolimerów (na przykład polilaktydu) można modulować parametry takie jak przepuszczalność wody czy powietrza, nadając bakteryjnej celulozie pożądane cechy, a zachowując pełną biodegradowalność.



Il. 2. Dr Marija Mojicević z Athlone Institute of Technology prezentuje pozyskaną bakteryjną celulozę, fot. Marija Mojicević



Il. 3. Bakteryjna celuloza pozyskana na drodze fermentacji glukozy barwiona kurkumą, fot. Marija Mojicević

Polimery oparte na hydroksykwasach

Jako mikrobiolog zafascynowałem się zdolnością mikroorganizmów do wytwarzania skomplikowanych mechanizmów obronnych przed niesprzyjającymi warunkami środowiska. Strategie te polegają na syntetyzowaniu różnorodnych substancji, które czy to pomagają im przetrwać czas, kiedy brakuje pożywienia w otoczeniu, czy to umożliwiają aktywną obronę przed innymi mikroorganizmami. Takimi substancjami są hydroksykwasy – z jednej strony kwasy organiczne, z drugiej alkohole połączone w jednej molekuły. Mikroorganizmy potrafią je wytwarzać jako pojedyncze cząsteczki do otaczającego je środowiska lub jako długie liniowe polimery akumulowane wewnątrz swoich mikroskopijnych organizmów. Akumulacja tych pierwszych powoduje, że otaczająca bakterie pożywka staje się coraz bardziej kwaśna, co nie pozwala na wzrost innych drobnoustrojów. Substancją tą jest kwas mlekowy. Od stuleci czerpaliśmy korzyści z tego zjawiska tylko w dziedzinie kulinarnej – tak bowiem powstają dobrze znane i lubiane kiszonki. Niemniej kwas mlekowy z powodzeniem można wyizolować z kiszonek i poddać przemianom chemicznym, dzięki którym powstaje polimer – polilaktyd (polylactic acid, PLA). Istnieje kilka rodzajów PLA, które różnią się między sobą kilkoma niuansami fizykochemicznymi, a zależy to od jakości monomerów je budujących³. Niemniej jednak właściwości tego twardego polimeru zbliżone

są do polipropylenu (dla porównania omawianych polimerów przeanalizuj tab. 1). Na świecie PLA zyskał dużą popularność dzięki swojej plastyczności i łatwości w obróbce. Syntezuje się go w dużych ilościach w Europie, Ameryce czy Azji, głównie z odpadów z przemysłu rolnego – takich jak gliceryna czy serwatka. Po syntezie chemicznej łatwo formuje się z niego granulaty, który może być przetwarzany na podobne sposoby jak tradycyjne petrochemiczne polimery. Można go używać do formowania poprzez wtryskiwanie, rozdmuchiwanie czy formowanie do postaci nici używanych w druku 3D. Sam polimer jest przezroczysty do lekko mlecznego w odcieniu, jednakże przez domieszkowanie barwników można uzyskać wszystkie kolory tęczy. PLA można też łączyć z innymi polimerami, uzyskując nowe, nieodkryte jeszcze cechy. Dla przykładu naukowcy z Politechniki Gdańskiej wytworzyli kompozyt PLA-skrobia opatentowany pod nazwą BioGranAqua, który można wykorzystywać do druku 3D.

W znacznej większości produkty wytworzone z PLA są biodegradowalne. Należy zaznaczyć, że rozkładowi ulegają tylko po rozdrobnieniu i w kompoście przemysłowym, w którym monitorowane są parametry degradującej flory, takie jak temperatura, wilgotność i napowietrzenie. W środowisku naturalnym (gleba, oceany) PLA ulega rozkładowi dość opornie, ze względu na swoją wewnętrzną strukturę, a dokładnie na stopień krystaliczności. Im bardziej uporządkowane są jego polimerowe łańcuchy (większy stopień krystaliczności), tym gorzej poddaje się biodegradacji. Podobny wpływ na proces rozkładu mają różnorodne domieszki stosowane w programowaniu dodatkowych właściwości wszystkich biodegradowalnych polimerów. Z tego względu należy mieć zawsze na uwadze cykl życia danego materiału, z którym przychodzi nam pracować. Etykieta „biodegradowalności” wcale nie oznacza, że po wyrzuceniu do kosza dana rzecz ulegnie rozkładowi. Wręcz przeciwnie, może zalegać w środowisku długi czas, jeżeli nie będzie odpowiednio przetworzona. Z tego względu należy świadomie dobrać materiały w projektowanych formach, ponieważ skład całościowy materiału końcowego użytego w produkcji będzie miał znaczący wpływ na procesy biodegradacji (na przykład użycie domieszki srebra skutkuje przeciwbakteryjnym charakterem materiału, który z trudnością będzie ulegał rozkładowi przez mikroorganizmy). Reasumując, brak świadomego prototypowania wywołuje negatywne konsekwencje w użytkowaniu ewentualnych zamienników, takich jak PLA.

Wspomniałem wcześniej o zdolności bakterii do polimeryzowania hydroksykwasów, czyli łączenia ich w swoich komórkach w długie i liniowe polimery. Takie „zachowanie” mikroorganizmów jest jednym z mechanizmów obronnych przed trudnymi warunkami środowiskowymi, w jakich czasami się znajdują. Potrafią one wtedy zmobilizować swój aparat biochemiczny do wytwarzania granulek wypełnionych po brzegi polimerem. Pierwszy raz takie zjawisko zaobserwował Francuz Maurice Lemoigne w 1925

roku, kiedy to wykazał, że nieznaną materię akumulowaną przez bakterię *Bacillus megaterium* był homopoliestrem kwasu 3-hydroksymasłowego (polyhydroxybutyrate, PHB). Nie pamiętano o tym odkryciu aż do lat 80. ubiegłego wieku, kiedy to Marie de Smet z kolegami odkryli inny polimer z tej samej rodziny składający się z nieco dłuższych monomerów⁴. Przez kolejne lata raportowano o innych możliwych monomerach mogących wchodzić w skład tych bakteryjnych poliestrów – jak do tej pory zidentyfikowano ponad 150 różnych hydroksykwasów, a co za tym idzie – praktycznie nieograniczoną możliwość tworzenia polimerów o różnorodnych właściwościach mechanicznych i fizykochemicznych. Całą rodzinę nazwano poli-hydroksyalkanianami (polyhydroxyalcanoates, PHA). Dla przykładu najlepiej poznany polimer z tej rodziny, PHB – jest twardym i kruchym poliestrem (tab. 1). Wydłużając natomiast długość budujących PHA hydroksykwasów, możemy otrzymać elastyczne i ciągliwe polimery, takie jak poli-hydroksyoktanian (PHO, il. 4). Wydłużając te łańcuchy dalej, otrzymujemy płynne, lepkie polimery, które z powodzeniem można stosować jako naturalne kleje. W swojej pracy zajmuję się właśnie syntezą i zastosowaniami polimerów z całej grupy PHA.

Polimer	Skrót	Temperatura zeszklenia T_g (°C)	Temperatura topnienia T_m (°C)	Moduł Younga (MPa)	Wydłużenie przy zerwaniu (%)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)
Polietylen niskiej gęstości	LDPE	-100	98-115	300 + 500	100 + 1000	9 + 15
Polistyren	PS	70 + 115	100	2300 + 3300	120 + 250	34 + 50
Poli-(D,L)-laktyd	PLA	65 + 72	220 + 330	8600	30	880
Poli-(L)-laktyd	PLLA	50 + 65	170 + 190	7000 + 10000	12 + 26	120 + 2300
Poli-(D)-laktyd	PDLA	50 + 60	-	1500 + 1900	5 + 10	40 + 50
Poli-(3)-hydroksymaślan	PHB	0	140 + 180	3500	5 + 8	25 + 40
Poli-(3)-hydroksyoktanian	PHO	-35	53	12,6 + 25,4	3 + 25	18 + 24
Kopolimer kwasu 3-hydroksymasłowego i 3-hydroksywalerianowego	P(HB-co-HV)	0 + 30	100 + 190	600 + 1000	7 + 15	25 + 30
Poli(tereftalan etylenu)	PET	69 + 115	265	1700 + 2700	180	50
Polikaprolakton	PCL	-69	59 + 64	390 + 470	700 + 1000	4 + 28
Polipropylen	PP	-15	171 + 186	690 + 1500	40	39

Tab. 1. Właściwości termiczne i mechaniczne popularnych i przedstawionych w artykule polimerów (zapożyczone z mojego opracowania dotyczącego bioplastyków opartych na hydroksykwasach⁶)



*Il. 4. Polimer polihydroksyoktanian (PHO) w gotowej formie do dalszej obróbki pozyskany z bakterii *Pseudomonas putida* wzrastającej na kwasie oktanowym, fot. Justyna Prajsnar*

Ostatnie dekady zaowocowały swoistym boomem doniesień literaturowych i patentowych związanych z PHA⁷. Bardzo dobrze wiemy, jak mikroorganizmy akumulują te polimery, gdzie to ma miejsce i w jakich warunkach. Te pionierskie badania podstawowe znalazły swoje przełożenie na zastosowania praktyczne. Umożliwiły produkcję na wielką skalę na drodze fermentacji między innymi PHB. Niemniej jednak jeszcze jesteśmy na etapie wdrażania procedur produkcyjnych dla innych polimerów z rodziny PHA. Z początku polimery te były głównie studiowane pod kątem ich zastosowań w medycynie. PHA są biodegradowalne, to znaczy implanty z nich produkowane po wszczępieniu w ciało rozpoznawane są jako swoje, ponieważ każdy z nas, konsumując tłuszcze, produkuje identyczne monomery z tymi wchodzącymi w skład PHA. Ponieważ cena polimerów PHA kilkukrotnie przewyższa cenę tych tradycyjnych, nie myślano początkowo o ich wykorzystaniu w codziennym użytku. Ta sytuacja zmienia się na naszych oczach. Procesy prowadzące do produkcji PHA stają się coraz bardziej opłacalne – czy to poprzez zastosowania odpowiednich bakterii, czy to dzięki coraz to większej liczbie instalacji produkujących te materiały. Kolejnym czynnikiem, dzięki któremu w najbliższym czasie polimery PHA wejdą

na rynki z dużym przytupem, są kierunki legislacyjne poszczególnych państw czy Unii Europejskiej. Należy tutaj wspomnieć, że PHA są polimerami biodegradowalnymi. Są mniej krystaliczne niż wspomniany wyżej PLA i dzięki temu szybciej ulegają rozkładowi w różnych środowiskach. Dla przykładu w kompoście przemysłowym PHB znika na przestrzeni 60 dni, natomiast polimery PHA w środowiskach niekontrolowanych (takich jak gleba czy oceany) rozkładowi ulegają do trzech lat w zależności, jakie monomery wchodzi w ich skład⁸.

Nakreśliłem, że PHA produkują bakterie, jednak nie wspomniałem o tym, z czego można wytwarzać te bioplastiki. Jako że syntetyzują je bakterie, do ich produkcji może posłużyć niemalże każde źródło węgla dostępne w przyrodzie. Najłatwiej przyswajalne i wykorzystywane na dużą skalę są te pochodzenia roślinnego i zwierzęcego – tłuszcze (gliceryna i kwasy tłuszczowe) czy wszelakie cukry. Polihydroksyalkaniany, a głównie PHB, powszechnie występują w osadzie czynnym obecnym w oczyszczalniach ścieków. PHA w pośredni sposób można również otrzymać z tradycyjnych petrochemicznych polimerów. Ten swoisty „upcycling” opiera się na dwóch krokach – w pierwszej kolejności polimery takie jak polietylen, polistyren czy poli(tereftalan etylenu) rozkładane są do monomerów na drodze pirolizy, następnie tak przygotowaną pożywkę podaje się bakteriom, które wzrastając na niej, wytwarzają biopolimery PHA. Istnieją również takie bakterie, które wzrastają na gazie syntezowym, czyli mieszaninie tlenu węgla, dwutlenku węgla i wodoru. Mikroorganizmy te z tlenków węgla wytwarzają różową biomasę zawierającą spore ilości PHB.

Polimery PHA są termoplastyczne, co umożliwia ich dalsze przetwarzanie tradycyjnymi metodami wykorzystywanymi w przetwórstwie tworzyw sztucznych, to jest wtrysk, wylączenie. W moim laboratorium w Krakowie (Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. J. Habera Polskiej Akademii Nauk) wykorzystujemy pochodne olejów roślinnych – glicerynę i kwasy tłuszczowe – do produkcji dwóch rodzajów PHA, a mianowicie twardego i kruche PHB, jak i płynnego polimeru o nazwie mcl-PHA. Pierwszy z powodzeniem może być wykorzystywany w tradycyjnym przetwórstwie, jak i w druku 3D. Drugi zaś ma cechy naturalnego kleju. Oba te polimery można mieszać w różnych proporcjach, otrzymując w ten sposób elastyczne materiały, a te z powodzeniem stosować nie tylko do produkcji przedmiotów codziennego użytku, lecz również (w medycynie) do wytwarzania implantów kości czy chrząstki.

Poniżej przedstawiam skrót dokonań w światowej komercjalizacji polimerów z rodziny PHA w zastosowaniach przemysłowych zapożyczony z mojego większego opracowania⁹. Pierwszą próbą komercjalizacji opakowań z PHA było wytworzenie „produktu całkowicie biodegradowalnego”, butelek szamponu WellaTM (Niemcy), z wykorzystaniem Biopolu[®]. Jednakże

ze względu na wysoką cenę produkt ten nie podbił rynku. Kolejnym przykładem jest projekt firmy Cove ze Stanów Zjednoczonych, która dwa lata temu wypuściła na rynek butelkę z PHB za dwa dolary. Nestle i PepsiCo również zwracają swoje oczy w stronę PHA. W planach obie te firmy mają wykorzystanie polimerów PHA firmy Nodax w konstrukcji nie tylko butelek, lecz również innych opakowań dla swoich produktów. PHA zostały także zastosowane do produkcji folii opakowaniowych, toreb na zakupy, pojemników i powłok papierowych, artykułów jednorazowego użytku, takich jak maszynki do golenia, naczynia, sztuce, przybory kuchenne, pieluchy, produkty higieny kobiecej, pojemniki kosmetyczne i kubki, a także znalazły zastosowanie do celów medycznych: produkcji odzieży chirurgicznej, mat, pokryć czy opakowań. Produkty zostały wytworzone na przykład przez firmy: Metabolix (USA), Biomer (Niemcy), BASF SE (Niemcy); P&G Chemicals (USA), ICI (Wielka Brytania) czy BIOPOL (Brazylia). Na bazie PHA powstają również liczne filamenty do druku 3D, a można je kupić między innymi od takich producentów jak Zortrax (Polska), colorFabb (Holandia) i 3D Printlife (USA).



Il. 5. Marker wykonany między innymi z polimeru PHB, źródło: carloratti.com/project/scribit-pen/



Il. 6. Szafki firmy Kartell z serii Componibili wykonane na bazie PHB pochodzącego z agroodpadów, fot. Simona Pesarini

Il. 7. Urny zaprojektowane przez holenderskie Studio Nienke Hoogvliet, fot. Studio Nienke Hoogvliet



Polimery oparte na hydroksykwasach zostały już przetestowane w formowaniu przedmiotów codziennego użytku przez wspomniane wyżej firmy. Dzięki swojej plastyczności pozwalają na ich szerokie zastosowanie. Przygotowując się do tego artykułu, natrafiłem na kilka ciekawych przykładów, które opisuję poniżej. Włoskie studio Carlo Ratti Associati (CRA) zaprojektowało kompostowalny marker z jadalnym tuszem (il. 5)¹⁰. Obudowa dostępna jest w wersji skonstruowanej z PHB, trocin czy aluminium, a wkład wykonany jest z PHB napełnionego jadalnym tuszem. Innym przykładem użycia biopolimeru PHB jest zaprojektowanie obudowy długopisu przez alumna Instytutu Pratta Garretta Benischa¹¹. Biopolimer w tym przypadku pozyskiwany jest z osadu czynnego z oczyszczalni ścieków. Polihydroksalkaniany z powrotem mogą posłużyć jako materiał do wytwarzania mebli, czego przykładem są przeprojektowane przez Kartell na bazie PHB pochodzącego z agroodpadów szafki do przechowywania z kultowej serii Componibili (il. 6)¹². Innym ciekawym zastosowaniem PLA i PHB jest użycie techniki druku 3D w produkcji designerskich okularów, co jest dziełem Vlasta Kubušová z Crafting Plastics Studio, wykorzystującego mieszaninę biopolimerów do swoich dzieł¹³. Chyba najlepszym urzeczywistnieniem gospodarki o obiegu zamkniętym jest ostatni przykład. Holenderskie Studio Nienke Hoogvliet sięgnęło po pulę bioplastiku PHB powstającego ze ścieków w osadach czynnych, tylko po to, aby stworzyć urny do przechowywania spopielenych ludzkich ciał. W projekcie Mourn¹⁴ opracowano proces zasklepienia spopielenych zwłok w kształtce wykonanej z PHB. Tak przygotowany obiekt po umieszczeniu w środowisku, stopniowo się rozkładając, zwraca naturze zatopione w nim składniki odżywcze pochodzące z ludzkiego ciała.

Podsumowując, królestwa mikroorganizmów – grzybów i bakterii – stanowią niezwykle ciekawy rezerwuar materiałów. Wspomniałam tutaj o czterech ich typach, jednakże jest ich o wiele więcej. W nadchodzących dekadach będziemy zmuszeni do poszukiwania alternatyw dla tradycyjnych polimerów, również sposobów usunięcia tych ostatnich ze środowiska. Jedyną słuszną drogą jest zwrot ku biotworzywom. Niemniej jednak ważne jest, abyśmy poznali w pierwszej kolejności siłę i jakość oddziaływania na środowisko każdego nowego tworzywa, jakie wyprodukujemy. Należy odrobić lekcję z minionych lat, kiedy nikt nie zastanawiał się, jakie potencjalne zagrożenia może przynieść stosowanie petrochemicznych polimerów.

Przypisy

1. Zob. ecovatedesign.com [data dostępu: 3.8.2021].
2. J. Wang, J.Tavakoli, Y. Tang, *Bacterial Cellulose Production, Properties and Applications with Different Culture Methods – a Review*, „Carbohydrate Polymers” 2019, vol. 219, s. 63–76.
3. M. Guzik [i in.], *Bioplastiki przyszłości – polimery zbudowane z hydroksykwasów*, w: *Biogospodarka. Wybrane aspekty*, pod red. M. Pink, M. Wojnarowskiej, Difin, Warszawa 2020, s. 391–453.
4. M.J. de Smet [i in.], *Characterization of Intracellular Inclusions Formed by Pseudomonas Oleovorans During Growth on Octane*, „Journal of Bacteriology” 1983, vol. 154, no. 2, s. 870–878.
5. A. Steinbüchel, H.E. Valentin, *Diversity of Bacterial Polyhydroxyalkanoic Acids*, „FEMS Microbiology Letters” 1995, vol. 128, s. 219–228.
6. M. Guzik [i in.], *Bioplastiki przyszłości – polimery zbudowane z hydroksykwasów*, dz. cyt.
7. M. Guzik [i in.], *What Has Been Trending in the Research of Polyhydroxyalkanoates? A Systematic Review*, „Frontiers in Bioengineering and Biotechnology” 2020, vol. 8; J. Nikodinovic-Runic [i in.], *Chapter Four – Carbon-Rich Wastes as Feedstocks for Biodegradable Polymer (Polyhydroxyalkanoate) Production Using Bacteria*, „Advances in Applied Microbiology” 2013, vol. 84, s. 139–200; M.A. Prieto, *From Oil to Bioplastics, a Dream Come True?*, „Journal of Bacteriology” 2007, vol. 189, no. 2, s. 289–290;
8. T. Narancic [i in.], *Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution*, „Environmental Science & Technology” 2018, vol. 52, s. 10441–10452.
9. M. Guzik [i in.], *Bioplastiki przyszłości – polimery zbudowane z hydroksykwasów*, dz. cyt.
10. carloratti.com/project/scribit-pen/ [data dostępu: 6.8.2020].
11. dezeen.com/2019/07/09/sum-waste-pen-garrett-benisch-pratt/ [data dostępu: 6.8.2020].

12. www.kartell.com/Pl/best-sellers/componibili-bio/05970 [data dostępu: 6.8.2020].
13. craftingplastics.com/nuatan [data dostępu: 6.8.2020].
14. nienkehoogvliet.nl/portfolio/mourn/ [data dostępu: 6.8.2020].

Bibliografia

1. R.P. Babu, K. O'Connor, R. Seeram, *Current progress on bio-based polymers and their future trends*, „Progress in Biomaterials” 2013, vol. 2, issue 8.
2. M. Guzik [i in.], *Bioplastiki przyszłości – polimery zbudowane z hydroksykwasów*, w: *Biogospodarka. Wybrane aspekty*, pod red. M. Pink, M. Wojnarowskiej, Difin, Warszawa 2020, s. 391–453.
3. M. Guzik [i in.], *What Has Been Trending in the Research of Polyhydroxyalkanoates? A Systematic Review*, „Frontiers in Bioengineering and Biotechnology” 2020, vol. 8.
4. T. Narancic [i in.], *Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution*, „Environmental Science & Technology” 2018, vol. 52, s. 10441–10452.
5. J. Nikodinovic-Runic [i in.], *Chapter Four – Carbon-Rich Wastes as Feedstocks for Biodegradable Polymer (Polyhydroxyalkanoate) Production Using Bacteria*, „Advances in Applied Microbiology” 2013, vol. 84, s. 139–200.
6. M.A. Prieto, *From Oil to Bioplastics, a Dream Come True?*, „Journal of Bacteriology” 2007, vol. 189, no. 2, s. 289–290.
7. A. Steinbüchel, H.E. Valentin, *Diversity of Bacterial Polyhydroxyalkanoic Acids*, „FEMS Microbiology Letters” 1995, vol. 128, s. 219–228.
8. J. Wang, J. Tavakoli, Y. Tang, *Bacterial Cellulose Production, Properties and Applications with Different Culture Methods – a Review*, „Carbohydrate Polymers” 2019, vol. 219, s. 63–76.

Abstrakt

Natura jest przeogromną kopalnią różnorodnych materiałów. Jednym z nich są polimery produkowane przez mikroorganizmy. Część z nich z powodzeniem może być wykorzystywana jako zamienniki tradycyjnych plastików. Mikroby przychodzą z pomocą przy wytwarzaniu substytutów styropianu, sztucznej skóry czy polimerów używanych do produkcji butelek, reklamówek i innych jednorazowych opakowań. Plastyczność tych biologicznych tworzyw umożliwia ich stosowanie w wielu dziedzinach naszego życia, a ich biodegradowalność z pewnością przyczyni się do ochrony naszej unikatowej planety przed degradacją. W artykule przedstawione zostaną cztery alternatywne materiały syntetyzowane przez mikroorganizmy. W pierwszej części opisane zostaną dwa, które mogą zastąpić styropian czy skórę do wyrobów kaletniczych. W drugiej opiszę polimery pochodzące pośrednio i bezpośrednio od bakterii, a będące główną dziedziną moich badań – polilaktyd i polihydroksyalkaniany.

Artykuł dostępny online:

<https://formy.xyz/artykul/bioplastiki-zapozyczone-ze-swiata-mikrobow/>

dostęp: 18.11.2025

3 **Bioplastics borrowed from the microbe world**

Abstract EN

Nature is a vast mine of diverse materials. One of them are polymers produced by micro-organisms. Some can be effectively used as replacements of traditional plastics. Microbes come forward when producing substitutes of polystyrene foam, artificial leather and polymers used for manufacturing bottles, plastic bags and other disposable packaging. Plasticity of these biological materials makes them applicable in many areas of our lives, and their biodegradability will surely add to protecting our unique planet. This article presents four alternative materials synthesised by micro-organisms. The first part describes two, which can replace polystyrene foam or crafting leather. Further, the text depicts polymers directly and indirectly derived from bacteria, which are the main area of the author's research – polylactic acid and polyhydroxyalkanoates.

Keywords: bioplastics, bacterial cellulose, polylactic acid, 3D print