

# Tworzywa polimerowe w zrównoważonym rozwoju – od potrzeby użycia do potrzeby zużycia

## Cz. I. Nie ma odwrotu od „plastików”

Jacek Kijęński<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.11.1](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.11.1)

**Streszczenie:** Pakiet Propozycji dla Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, przyjęty w UE w 2015 roku, jest obecnie najbardziej dojrzałą formą realizacji Strategii Zrównoważonego Rozwoju. W wykonaniu założeń GOZ tworzywa polimerowe odgrywają rolę zarówno środka działania, jak i jego celu. W pracy omówiono znaczenie tworzyw polimerowych we współczesnym świecie jako podstawowego materiału konstrukcyjnego, wszechobecnego we wszystkich dziedzinach gospodarki, życia codziennego i kultury oraz ich, niedostrzeganą często, funkcję w ochronie środowiska naturalnego. Wykazano również, że współczesna nauka i technika nie dysponują substytutami mogącymi, chociaż częściowo, zastąpić „plastiki” zasługujące na miano *materiału tysiąclecia* w ich funkcjach użytkowych, z jednoczesnym ograniczeniem oddziaływania odpadów poużytkowych na środowisko naturalne. Pokazano również rzeczywiste przyczyny gromadzenia się tych odpadów w otoczeniu człowieka.

**Słowa kluczowe:** tworzywa polimerowe, zrównoważony rozwój, Gospodarka o Obiegu Zamkniętym, ochrona środowiska.

### Polymeric materials in sustainable development – from the need to use to the need for wear

#### Part I. There is no turning back from „plastics”

**Abstract:** The Packet for Circular Economy accepted by EU in 2015 is actually the most mature form for the realization of the Strategy for Sustainable Development. For the implementation of its assumption plastics play the role of the aim of the activity as well as of the aid for it. The importance of polymeric materials for the contemporary world as a constructional material omnipresent in all branches of economy, everyday life and culture was demonstrated within this study. Moreover, their unrecognized and often underestimated significance for the environment protection was depicted. It was also revealed that science and technology still did not find any substitutes allowing, even partially, for the replacement for *material of millennium* as plastics are in their commercial applications with simultaneous reduction of the environmental impact of end-life wastes. The real reasons of the accumulation of these wastes in the nature were also discussed in detail.

**Keywords:** polymeric materials, sustainable development, The Packet for Circular Economy, environmental protection.

### ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ

Według definicji zawartej w raporcie „Our Common Future” [1] pojęcie zrównoważonego rozwoju oznacza rozwój zapewniający zaspokojenie potrzeb obecnych, a jednocześnie nieograniczający możliwości zaspokojenia potrzeb przyszłych pokoleń.

Strategia zrównoważonego rozwoju cywilizacji wg „Our Common Future” zakłada realizację dwóch celów

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Instytut Chemii, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock,  
e-mail: [Jacek.Kijenski@pw.edu.pl](mailto:Jacek.Kijenski@pw.edu.pl)

nadrzędnych – wyrównania szans wszystkich członków populacji (bogatej północy i biednego południa) oraz zachowanie dla przyszłych pokoleń stanu planety w jak najmniej zmienionym stanie. Oznacza to spowolnienie eksploatacji zasobów surowcowych i energetycznych Ziemi oraz powodowania nieodwracalnych zmian jej środowiska naturalnego. W odpowiedzi na przesłanie zawarte w strategii zrównoważonego rozwoju opracowano dwa docelowe modele rozwoju cywilizacji ludzkiej [2]. Pierwszy z nich to zamknięty układ wytwarzania i konsumpcji dóbr, wymieniający z otoczeniem tylko energię. W układzie tym wszystkie dobra konsumpcyjne są wykonane z materiałów, które po zakończeniu cyklu życia mogą być przetwarzane powtórnie. Drugi układ jest ca-

kowicie otwarty, a wszystkie użytkowe dobra konsumpcyjne są wykonane z materiałów pochodzenia naturalnego, całkowicie biodegradowalnych. W modelu tym przyroda, w niekończącym się łańcuchu cykli, ma za zadanie dostarczać surowców do wytwarzania różnorodnych substancji i materiałów, nośniki energii do ich przetwarzania, ogrzewania i oświetlenia świata, a także rozwiązać problem gromadzących się odpadów pokonsumpcyjnych.

Żaden z przedstawionych modeli nie jest jednak realny. Pierwszy – ponieważ wszystkie znane materiały w czasie użytkowania ulegają częściowemu zużyciu, a procesy ich wtórnego przetwarzania, zgodnie z II zasadą termodynamiki, przebiegają ze sprawnością dość odległą od jedności. O nierealności drugiego decyduje zdecydowana przewaga potrzeb cywilizacji nad możliwościami natury. Ciągły wzrost standardu życia (kraje rozwijające się), nadprodukcja dóbr konsumpcyjnych napędzana przez światowe koncerny, a przede wszystkim rozpędzający się przyrost populacji (znowu kraje rozwijające się) stanowią niespotykane dotąd wyzwanie dla człowieka i przyrody, zarówno w sferze pozyskiwania surowców mineralnych i odnawialnych, skutków tego pozyskiwania dla środowiska naturalnego, jak i utylizacji odpadów poużytkowych, których gigantyczne ilości są gromadzone na składowiskach i w środowisku z ciągle rosnącą dynamiką. Konkurencja upraw żywnościowych z uprawami o przeznaczeniu technicznym pogłębia niewydolność natury w obszarze odnawialnego modelu rozwoju cywilizacji.

Po niemal 25 latach od powstania tych modeli, ze świadomością ich ograniczeń (mam nadzieję), sformułowano w Komisji Europejskiej Pakiet Propozycji dla Gospodarki o Obiegu Zamkniętym („Circular Economy”, grudzień 2015) [3]. Koncepcja ta w zakresie dotyczącym tworzyw polimerowych ogranicza się na razie do wskazania najbardziej istotnych kierunków działania i mapy dochodzenia do wytyczonych dla nich celów, bez określenia realistycznych dróg i ścieżek realizacji. Najważniejsze działania dotyczą opakowań – do 2030 roku wszystkie opakowania z tworzyw polimerowych muszą mieć możliwość recyklingu, a zużycie tworzyw na przedmioty jednorazowego użytku ma być konsekwentnie minimalizowane. Przewiduje się również istotne ograniczenia w stosowaniu mikrodrobin „plastików” (przede wszystkim w chemii gospodarczej i kosmetyce). Przedstawienie sposobów realizacji poszczególnych zadań z Pakietu jest wyzwaniem, ponieważ wymaga bilansowania możliwości i skutków w bardzo szerokim obszarze gospodarczo-społecznym. Nie ulega jednak wątpliwości, że proponowane rozwiązania będą musiały mieć charakter hybrydowy, uwzględniający wykorzystanie najbardziej efektywnych i niewykluczających się wzajemnie elementów obu przedstawionych wcześniej modeli rozwojowych.

Na razie „Circular Economy” należy rozumieć jako dążenie do wielokrotnego wykorzystania materiałów i energii, ich oszczędne użytkowanie, zwiększenie

udziału źródeł odnawialnych w pozyskiwaniu surowców i energii w celu ograniczenia nieodwracalnych dla środowiska skutków wydobywania surowców mineralnych i nośników energii oraz wyrównania coraz bardziej niekorzystnego bilansu energetycznego współczesnego świata.

Podstawowymi zasadami określającymi funkcjonowanie Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, a zarazem jej narzędziami są zatem RECYKLING dóbr i materiałów i ODZYSK ENERGII. Tworzywa polimerowe, które ze względu na ich rolę gospodarczą i społeczną we współczesnym świecie można określić jako materiał tysiąclecia, są dla Gospodarki o Obiegu Zamkniętym zarówno środkiem, jak i celem.

## MATERIAŁ TYSIĄCLECIA

### Materiały konstrukcyjne budującej potęgę cywilizacji

Odkrycia nowych materiałów i opanowywanie sposobów ich przetwórstwa przyczyniły się do tworzenia potęgi kolejnych wielkich cywilizacji. Trzy tysiące lat przed narodzinami Chrystusa (a.a.Ch.) w państwie Sumerów opanowano obróbkę brązu. Toporem z tego stopu miedzi i cyny, określanym jako niebiański metal, Gilgamesz ściał cedr swojego życia, a ok. 1200 a.a.Ch. w nieodległej Troadzie rozegrała się wojna trojańska, największa bitwa starożytności, w której wzięli udział wojownicy uzbrojeni w miecze i tarcze z brązu. Około 2300 a.a.Ch. w Indiach, Mezopotamii i na wyżynie Azji Mniejszej po raz pierwszy do wyrobu narzędzi wykorzystano pochodzące z meteorytów żelazo. Państwo Hetytów swoją potęgę zawdzięczało eksploatacji złóż rud żelaza, jego wytopowi (w Cylicji, XVI w.a.Ch.) i produkcji broni, której technologia nie była znana w ówczesnym świecie. Militarne wykorzystanie wpłynęło na szybkie rozpowszechnienie żelaza jako materiału konstrukcyjnego. Dwieście lat później w Armenii i na południowym Kaukazie zaczęto wytwarzać stal zgrzewalną, stopniowo wypierającą żelazo ze wspomnianych zastosowań.

Ateny swój wielki potencjał gospodarczy budowały, bazując na wydobywaniu w górach Laurion rud ołowiu i srebra i stworzeniu na podstawie tych metali nowoczesnego rzemiosła. Imperium Rzymskie wydobywało na terenie podbitej Brytanii rudy cyny (Kornwalia i Walia), rudy żelaza, ołowiu i miedzi, a nawet węgiel jako nośnik energii potrzebnej do ich przetwórstwa.

W V w.n.e. pojawiła się stal damasceńska (sposób jej wytwarzania jest do dziś osnuty mgłą tajemnicy) – materiał bardzo użyteczny dla Maurów w ich podbojach. Metoda walcowania, opracowana przez Johna Payne w 1728 r., pozwoliła na wyrób szerokiej gamy wyrobów hutniczych, tj. sztaby, pręty płaskie i kształtowe, w skali niemożliwej do osiągnięcia za pomocą stosowanego wcześniej kucia. Na północy Wielkiej Brytanii w pobliżu złóż rud żelaza i węgla pojawiły się wielkie centra przemysłowe (Manchester, Liverpool, Birmingham, itd.), a jednym z ich sztandaro-

wych wyrobów stały się maszyny ze stali, powszechnie wkraczające do wielu branż przemysłu. Chwilę potem (1735 r.) A. Derby opracował metodę wykorzystania węgla kamiennego w procesie wytopu surówki, a w latach osiemdziesiątych XVIII w. B. Huntsman i H. Cort odkryli metodę uzyskiwania wysokiej temperatury w piecu hutniczym, co umożliwiło wytwarzanie surówki żelaza i stali na wielką skalę. Rozpoczęła się wielka rewolucja przemysłowa, której pierwszym beneficjentem było imperium brytyjskie (na początku XIX w. przemysł w Anglii przedstawiono niemal całkowicie na produkcję maszynową i silniki mechaniczne). Wynalazek H. Bessemiera – pierwsza przemysłowa metoda otrzymywania stali w tzw. procesie konwertowym – kilkadziesiąt lat później zrewolucjonizował już cały świat.

Historycznie rozwój potęgi cywilizacji człowieka jest jednak związany nie tylko z metalami. Ceramika użytkowa (najstarsze znaleziska sprzed 7 tys. lat), cegła (wynaleziona w Babilonie 4 tys. lat a.a.Ch.), szkło wynalezione przez Egipcjan w okresie Średniego Państwa, a udoskonalone przez Rzymian, oraz cement rodem ze starożytnego Rzymu to materiały konstrukcyjne, które do dziś pozwalają człowiekowi zaspokajać potrzeby konstrukcyjne w zakresie budownictwa, infrastruktury, gospodarstwa domowego, przemysłu i szeroko pojętej kultury materialnej. Materiały, których wspólnymi cechami są trwałość (poza kruchością i zdolnością do płynięcia szkła) i funkcjonalność. I wreszcie papier, dziecko Chin z II w.n.e., ponadczasowy nośnik przekazu informacji, powszechne i wykwintne opakowanie, atrybut – symbol pojęcia KULTURA.

Wydawało się, że wymienione materiały i ich hybrydowe kombinacje zaspokoją potrzeby ludzkości na wieczność. Rozwój syntezy organicznej, po przeprowadzonej przez Friedricha Wöhlera w 1828 r. syntezie mocznika, otworzył jednak zupełnie nowy obszar otrzymywania chemikaliów i materiałów.

### Na początku był celuloid

Jak na ironię (w kontekście współcześnie wypowiedzianej „plastikom” wojny) pierwsze tworzywo polimerowe otrzymano z surowców odnawialnych, w odpowiedzi na potrzeby ochrony środowiska. W połowie XIX w. bilard stał się najbardziej powszechną rozrywką i popularnym sportem w Stanach Zjednoczonych. Najlepsze kule bilardowe wykonywano wówczas z twardej i jednorodnej kości słoniowej. Kilkanaście tysięcy słoni afrykańskich zabijano rocznie w celu jej pozyskania, a jednym z głównych kierunków przetwórstwa było właśnie wytwarzanie kul bilardowych. W 1863 r. produkująca sprzęt bilardowy nowojorska firma Phelan & Collender przeznaczyła nagrodę 10 000 USD (ogromna suma w tamtych czasach) dla wynalazcy taniego, ale spełniającego wysokie wymagania techniczne materiału do wyrobu bili [4]. Ochrona słoni była tylko jednym z motywów działania, głównym było oczywiście unik-



Ilustracja 1. Legendarna pocztówka propagująca celuloidowy styl życia (i niestety ksenofobię)

Illustration 1. The legendary card popularizing celluloid style of life (and unfortunately popularizing xenophobia)

nięcie kosztów związanych z pozyskiwaniem i transportem kości na wielkie odległości. John Wesley Hyatt, drukarz z przedmieścia Nowego Jorku, podjął wyzwanie i, korzystając z wcześniejszych odkryć: Henry Braconnota (w 1833 r. otrzymał nitrocelulozę w wyniku nitrowania materiału roślinnego), Christiana Friedricha (w 1846 r. odkrył właściwości wybuchowe nitrocelulozy – bawełny strzelniczej) w 1870 r. opatentował celuloid (*like cellulose*), masę plastyczną zawierającą pyroksylinę (częściowo znitrowana celuloza), etanol, barwniki, pigmenty i kamforę. Wynalazek Hyatta stanowił modyfikację odkrycia Alexandra Parkesa – w 1862 r. opracował on collodion (Parkesine) – masę do formowania zawierającą celulozę, etanol i eter etylowy [5]. Proponowaną przez Parkesa masę nagrodzono na Międzynarodowej Wystawie w Londynie w 1869 r., ale jako zbyt droga odeszła w zapomnienie. Celuloid stwarzał znacznie szersze możliwości przetwórcze (wtryskiwanie, rozdmuchiwanie), a jego właściwości tj.: elastyczność, wodoszczelność, przezroczystość, spowodowały, że rynek szybko zalały wykonane z niego grzebienie, szpilki do włosów, kołnierzyki i mankiety do koszul [6]. Wkrótce asortyment poszerzył się o lalki i inne zabawki, biżuterię, guziki, klawisze pianina, sztuczne zęby, a w 1888 r. George Eastman (mąż Pani Kodak) podarował światu elastyczny film do fotografii i dla kina. Ruchome obrazy zapisane na celuloidowej taśmie stworzyły współczesne kino i na stałe weszły do kanonu kultury światowej. Celuloidowa taśma stała się wręcz synonimem filmu.

Co ciekawe, Hyatt nigdy nie ubiegał się o nagrodę 10 000 USD. Wykonane z celuloidu bile rozpryskiwały się przy zderzeniach, niezłe właściwości użytkowe wykazywały tylko kule wykonane z szelaku (odmiany żywicy naturalnej pozyskiwanej z wydzieliny owadów zwanych czerwcami, dodatkowo tańsze) lub pulpy wełnianej i powleczone cienką warstwą collodionu lub celuloidu dla wzmocnienia lub nadania barwy.

Lawinowo rosnące zainteresowanie wyrobami z celuloidu było kontynuacją trendów objawiających się już

w epoce wiktoriańskiej. Ten okres gwałtownej industrializacji charakteryzował się fascynacją naturalnymi polimerami, takimi jak: kauczuk naturalny lub szelak. Historyk Robert Friedel [6] przyczynę tego zainteresowania widzi w nadziei pokonania ograniczeń powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych – żelaza, drewna i szkła. Cechą kauczuków i żywic naturalnych, oprócz posiadania naturalnej elastyczności, była możliwość ich utwardzania pozwalającego na przystosowanie właściwości wykonanego produktu finalnego zgodnie z oczekiwaniami. Materiałów o podobnych właściwościach użytkowych, wymaganych także od współcześnie stosowanych tworzyw polimerowych, poszukiwano w II poł. XIX w. również wśród różnorodnych kombinacji surowców pochodzenia naturalnego – korka, trocin, gum i kauczuków lub białek z przemysłu mleczarskiego.

Celuloid doskonale wpisywał się w oczekiwania wytwórców dóbr codziennego użytku i modę na dobra użytkowe, ozdoby i biżuterię naturalnego pochodzenia. Łatwości i różnorodności kierunków jego przetwórstwa (mógł być formowany w różne kształtki, prasowany w cienkie arkusze i wylewany w folie) towarzyszyła podatność na modyfikację – centkowany w brązy i odcienie bursztynu doskonale naśladował muszlę żółtawą, odpowiednio zabarwiony imitował koral, lapis lazuli, karneol i inne kamienie półszlachetne, napełniony na czarno z powodzeniem udawał heban.

Wspomniane wcześniej kołnierzyki i mankiety, a także przody koszul – trwałe, łatwe do oczyszczenia (nigdy nie wymagały prania) – stały się wzorcem dla masowej mody na ubiór warstwy urzędniczej (dały początek kascie białych kołnierzyków), trafiły też do haseł agitacji ksenofobicznej rozpowszechniającej się w Ameryce po wojnie secesyjnej; gorączka złota i towarzysząca jej budowa transamerykańskiej linii kolejowej sprowadziła do Stanów rzesze chińskich emigrantów. Negatywne nastawienie do Chińczyków, pogardliwie nazywanych kulisami, w 1882 r. zaowocowało hamującym ich imigrację Chinese Exclusion Act. Na pocztówkach z tego okresu można znaleźć hasła: „No More Chinese Cheap Labor – Celluloid Cuffs, Collars and Bosoms” lub „Off for china. No More Washee Washee – Melican Man Wear Celluloid Collars and Cuffs” [6].

O schyłku epoki celuloidu, rozpoczętym w latach trzydziestych XX w., zdecydowały jego palność, emisje towarzyszące użytkowaniu (np. zapach kamfory towarzyszący wykonanym z niego elementom odzieży), wreszcie szybkie starzenie (jest przecież materiałem pochodzenia odnawialnego). Ciosem w rynek celuloidowych artykułów do pielęgnacji i układania włosów była zapoczątkowana w 1914 r. przez Irenę Castle – amerykańską gwiazdę pierwszych filmów – moda na krótkie włosy, która rozpowszechniła się wśród kobiet w latach dwudziestych i trzydziestych XX w. Era celuloidu przeminęła, a zasięg jego możliwości użytkowych i potencjał rynkowy były kamyczkiem, którego usunięcie rozerwało tamę wstrzymującą innowacje w dziedzinie otrzymywania nowych materiałów.

## ERA TWORZYW SYNTETYCZNYCH

W 1907 r. Henrik Baekeland opatentował pierwsze całkowicie syntetyczne tworzywo polimerowe – żywicę fenolowo-formaldehidową – bakelit. Twardy, trudnotopliwy i odporny chemicznie bakelit dynamicznie wyparł celuloid z wielu zastosowań i stał się głównym tworzywem nowej, na wskroś nowoczesnej, barwnej i dynamicznej epoki Art Deco. Na kolejne tworzywa polimerowe, przewyższające pod względem właściwości dwa pionierskie „plastiki” i otwierające szeroką gamę nowych aplikacji nie trzeba było długo czekać. W 1909 r. pojawiły się fenol- i aminoplasty, w 1930 r. polistyren, w 1930 r. poli(akrylan metylu), w 1938 r. Carruthers odkrył poliamidy, a Roy Plankett teflon. W 1939 r. opracowano wysokociśnieniową metodę otrzymywania polietyleny. Nowo wynalezione materiały niemal od razu znajdowały szerokie zastosowanie w życiu codziennym, w znacznym stopniu ich wykorzystanie wsparło ogromny wysiłek wojenny Aliantów podczas drugiej wojny światowej.

Dopiero jednak dzieło życia nazywanego Alchemikiem Karla Zieglera, który w 1953 r. opracował niskociśnieniową metodę polimeryzacji etylenu, wsparte rok później przez Gulio Nattę odkryciem stereospecyficznego polimeryzacji propylenu, uczyniło współczesny świat światem „plastików” tak powszechnych, że ich barw, zalet i dominującej roli w naszej codzienności już nie zauważamy. Dostrzegamy je tylko w postaci odrzuconych odpadów, za których los odpowiada nasz konsumpcyjny styl życia. A przecież żaden wynalazek od czasów ceramiki, szkła i żelaza nie wpłynął w takim stopniu jak „plastiki” na styl, godność i urodę życia człowieka.

„Celuloid – Pierwszy plastik” – tak zatytułowana jest poświęcona mu ekspozycja w nowojorskim American History Museum [7] – w pełni zasłużył na poświęconą mu uwagę. Jego ekspansja w świecie techniki i niemal równoległe sztuki doskonale oddaje sens pojęcia kultura materialna i skalę, w jakiej jesteśmy i chcemy być zależni od będących w naszej dyspozycji materiałów.

Celuloid nie zniknął całkowicie. Dziś, tak jak kiedyś, na całym świecie słychać dźwięk odbijającej się od drewnianego stołu białej piłeczki z celuloidu – to ping pong – jeden z najpopularniejszych sportów.

Wspomniany kontekst ochrony środowiska towarzyszył celuloidowi przez całą jego epokę. Jeden z popularnych sloganów reklamowych spółki braci Hyatt Celluloid Manufacturing Company brzmiał: „Tak jak ropa naftowa przyniosła ulgę wielorybom, celuloid podarował słoniom, żółwiom i koralowcom dłuższe życie w ich naturalnym środowisku, zniknęła też potrzeba przeorywania ziemi w pogoni za substancjami, na które zapotrzebowanie ustawicznie rośnie” [4].

Celuloid dzięki zastąpieniu materiałów, które były trudne do pozyskania albo drogie, zdemokratyzował dostępność dóbr dla szybko zwiększającej się konsumpcji klasy średniej – tak historyk Jeffrey Meikle spuentował

wał rolę kulturotwórczą pierwszego „plastiku” w swojej książce „American Plastic” [4].

Pojawienie się bakelitu i kolejnych ogniw wspaniałego łańcucha tworzyw polimerowych zdemokratyzowało stosunki społeczne – przystępność wynikająca ze skali produkcji i niskiej ceny skutkowało ich wszechobecnością, a tym samym dostępnością dóbr materialnych dla coraz szerszych warstw społeczeństwa.

Również dziś w świecie uporządkowanym według zasad kapitalizmu największą zaletą tworzyw polimerowych jest ich ekonomiczność, której miarą jest zdecydowanie najkorzystniejsza wśród powszechnie stosowanych materiałów relacja możliwych do uzyskania właściwości użytkowych do kosztów ich osiągnięcia. Ogromna różnorodność właściwości, wynikająca z szerokiej gamy dostępnych tworzyw polimerowych i niemal nieskończonych możliwości ich modyfikacji, pozwala na wytworzenie „plastiku” spełniającego wymagania każdego celu użytkowego. Bez tworzyw polimerowych nie istniałyby: nasz obszar mieszkalny, gospodarstwo domowe, transport, komunikacja, medycyna, sport, rozrywki, ale także, a może przede wszystkim, produkcja żywności i ochrona środowiska. Raz jeszcze warto powtórzyć – „plastiki” tak bardzo wypełniają naszą przestrzeń życiową, że zauważamy je dopiero tam, gdzie ich być nie powinno.

### **TWORZYWA POLIMEROWE CHRONIĄ TO CO NAJCENNIJSZE – ŻYWNOSĆ, ENERGIĘ, WODĘ I ZDROWIE**

Szczupłość miejsca przeznaczonego na niniejszą analizę nie pozwala na bardziej szczegółowe odniesienie się do poszczególnych obszarów niezbędnej obecności tworzyw polimerowych. Trzem z nich o fundamentalnym znaczeniu dla ludzkości poświęcono więcej miejsca.

#### **Żywność**

Organizm ludzki jest w stanie przetrwać bez odżywiania przez 8 tygodni. Permanentne niedożywienie to źródło cierpienia, ale też przyczyna zmian patologicznych. Każde społeczeństwo jest podzielone na odżywionych i niedożywionych, jednak klimat naszej planety i niechlubna przeszłość kolonizacyjno-konkwistadorska spowodowały, że niekorzystna dysproporcja ma zakres światowy, dzieląc glob na bogatą północ i głodujące południe. Z drugiej strony na świecie permanentnie marnotrawi się wytworzoną żywność. Według danych Komisji ONZ ds. Wyżywienia i Rolnictwa 1/3 produkowanej na świecie żywności staje się odpadem. Z kolei, według danych Natural Resources Defense Council produkcja żywności trafiającej na wysypiska kosztuje rocznie 165 mld USD. Koszty te obejmują 4% całkowitego zużycia ropy naftowej, ale też, co zasługuje na szczególne podkreślenie, 25% konsumpcji świeżej wody w USA. Praktyczna zasada przemysłu opakowaniowego głosi: energia zu-

żyta na wytworzenie opakowania stanowi jedynie 10% energii pochłoniętej przez żywność w ciągu całego cyklu jej życia, aż do chwili dostarczenia jej konsumentowi [8]. Redukcja tych 10% w wyniku zastąpienia „plastiku” innym materiałem musi skutkować znacznym zwiększeniem kosztów wytwarzania pozostałych 90% [8]. Decydują o tym właściwości barierowe tworzyw polimerowych, nie do osiągnięcia w wypadku innych materiałów, ani dziś, ani w najbliższej przyszłości.

Celofan, otrzymywany z wiskozy i uelastyczniony gliceryną przez Jacquesa C. Brandenbergera w 1908 r., po nadaniu wytworzonym z niego arkuszom wodoczelności przez pokrycie cienką warstwą lakieru nitrocelulozowego (William Hale Charch, 1927 r.), stał się pierwszym tworzywem polimerowym masowo wykorzystywanym do ochrony żywności przed zepsuciem i zanieczyszczeniem. Slogan reklamowy z czasów wprowadzenia go do powszechnego użytku doskonale oddaje higieniczne znaczenie celofanu i jego polimerowych następców w masowym obrocie żywnością: „Obce ręce. Wścibskie ręce. Brudne ręce. Dotykanie, obmacywanie, sprawdzanie towarów, które kupujesz w sklepach. Twoją niezawodną ochroną przed niepożądanymi rękami przed dojściem do kasy jest mocny, przejrzysty, nieprzepuszczalny dla bakterii celofan” (tłum. aut.) [9]. Dzięki celofanowi żywność dłużej utrzymywała świeżość i mogła być transportowana na znacznie większe odległości.

Skala zastosowań opakowaniowych tworzyw polimerowych jest dziś ogromna. Zgodnie z opublikowanym w 2016 r. raportem Ellen McArthur Foundation [10] w 2013 r. wyprodukowano na świecie 78 mln ton opakowań z „plastiku”. Większość do celów ochrony i transportu żywności. Zgodnie z zaakceptowanymi powszechnie danymi Ellen McArthur Foundation, po użyciu, z całej objętości wyprodukowanych na świecie tworzyw opakowaniowych jedynie 28% zebrano do dalszego przerobu (14% – spalanie i odzysk energii; 14% – zebrano do recyklingu, w tym 8% – recykling kaskadowy, 2% – zawrót surowcowy, 4% – straty procesowe), a pozostała większość, wg zwolenników ograniczenia stosowania materiałów tysiąclecia [11]: „zgromadziła się na wysypiskach (40%) i rozproszyła się na lądach i w oceanach (32%)”. To wielki problem, precyzyjnie ujęty przez Conrada MacKerrona, jednego z konsultantów Ellen McArthur Foundation: „Mamy do czynienia z wysoko inżynieryjnymi opakowaniami, które po zastosowaniu trwającym do kilku tygodni przez setki lat będą zalegać w środowisku”. Ponad 60% zalegających obecnie w oceanach tworzyw polimerowych (150 mln ton) mogą stanowić opakowania (dane na podstawie analizy struktury materiałów pozyskanych w procesach oczyszczania oceanów [8]). Przyczyny problemu i możliwości jego złagodzenia omówiono w dalszej części tekstu.

Rola tworzyw polimerowych w ochronie żywności jest nie do przecenienia, a ich zastosowanie bez wątpliwa stanowi kluczowe rozwiązanie w realizowanej przez świat strategii zrównoważonego rozwoju, zarówno w kontekście wyrównywania szans wszystkich członków populacji,

jak i szeroko pojętej oszczędności energii i, jednak, ochrony środowiska. Zanim podejmę dyskusję nad sensem i doborem poszczególnych sposobów zbierania, selekcjonowania i przerobu odpadów „plastików” przypomnę, że użyty przez eksperta z Ellen McArthur Foundation termin „wysoko inżynieryjne opakowania” określa ogromną większość materiałów opakowań żywności od dawna niewykonanych z prostych poliolefin, a stanowiących wielowarstwowe struktury z precyzyjnym przeznaczeniem dla ochraniających obiektów. Dzięki temu istotnie przedłużono świeżość żywności i okres jej ochrony sanitarnej. Kilka reprezentatywnych przykładów: ogórek – opakowanie w obkurczającą folię PE przedłuża jego przydatność do spożycia z 3 (sprzedawany luzem) do 14 dni, banan – opakowanie w perforowaną folię PE – z 15 do 36 dni, wołowina – po opakowaniu próżniowym w folię o wzmocnionej barierowości wobec tlenu – przedłużenie trwałości do 30 dni w stosunku do 4 dni w opakowaniu złożonym z tacki z pianki polistyrenowej i przylegającej folii PE i do 1 dnia luzem [8]. Według danych austriackiej grupy konsultingowej Denkstatt opakowania z użyciem tacki i próżniowej folii skiny zmniejszają straty wołowiny z 34% do 18%, a tym samym redukują ekwiwalent CO<sub>2</sub> o 2,1 kg na stek [8]. Ser żółty – zastąpienie opakowania papierowego (po pokrojeniu) kopertą ze spodem z poliestru i pokryciem warstwowym poliester-polietylen redukuje odpady z 5 do 0,14%, wreszcie pieczywo – zastąpienie torby papierowej folią z dwuosiuwoorientowanego polipropylenu pozwala na zmniejszenie strat z 11 do 0,8%.

Modyfikacje polimerów i rozwój metod ich przetwórstwa pozwalają na zachowanie funkcjonalności opakowań przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia materiału. Kilka lat temu taki projekt uruchomił koncern Coca-Cola Ltd. – ograniczył grubość ścianek butelek do produkowanych napojów gazowanych. Dziś wśród innych producentów możemy znaleźć skutecznych naśladowców koncernu Coca-Cola Ltd. (czasami można nawet odnieść wrażenie, że niektórzy w redukcji masy butelek posunęli się za daleko). Sztandarowym, zakończonym sukcesem przykładem ograniczenia materiałochłonności opakowań plastikowych jest amerykański kubeczek do jogurtu o pojemności 125 g, którego masę zmniejszono pod koniec lat 90 XX w. z 6,5 (1965 r.) do 3,5 g.

## ZUŻYCIE ENERGII

Najpowszechniej stosowanymi tworzywami polimerowymi są poliolefiny. Ich gęstość jest mniejsza niż gęstość wody, niemal ośmiokrotnie mniejsza niż gęstość stali i dwukrotnie mniejsza niż gęstość ceramiki i szkła. Oznacza to, że zastąpienie elementów lub wyrobów wykonanych z wymienionych i wielu innych tradycyjnych materiałów na wytworzone z polietylenu, polipropylenu, polistyrenu, a także z innych tworzyw o bardziej wyrefinowanym przeznaczeniu znacznie zmniejsza ciężar gotowych produktów.

Transport jest jednym z największych konsumentów energii w gospodarce światowej. Elementy konstrukcyjne

wykonane z tworzyw polimerowych zmniejszają ciężar samochodów, pociągów, samolotów i statków. Zastosowanie w ich budowie tworzyw jest świadectwem wdrożenia wizji energooszczędności w transporcie, sformułowanej przez genialnego wizjonera – Henryego Forda, który odstąpił od planowanego wykorzystania etanolu jako paliwa w Fordzie T (tlen obecny w cząsteczkach alkoholu jest niedostarczającym energii balastem) i w 1939 r. stwierdził: „Wszystko co możemy zrobić dla samochodu to uczynić go lżejszym” (w zakładach Forda prowadzono pionierskie próby stosowania jako materiałów konstrukcyjnych kompozytów polimerowych napełnionych odpadami roślinnymi). W wypadku przeciętnego samochodu z silnikiem iskrowym ilościowy wymiar idei Forda wyraża się starą praktyczną zasadą – 10-proc. zmniejszenie masy samochodu to 5-proc. wzrost ekonomiczności paliwa. Implementacja „plastików” w przemyśle samochodowym postępuje konsekwentnie, według American Metal Market (AMM) zawartość tworzyw polimerowych w samochodach wzrosła z 4,6% w 1977 r. do 7,6% w 2000 r. [12]. W latach późniejszych AMM nie kontynuował swojego przeglądu, ale zgodnie z danymi American Chemistry Council zawartość polimerów i ich kompozytów w przeciętnym amerykańskim samochodzie osobowym wzrosła z 7,3% w 2000 r. do 8,3% w roku 2004 [12].

Na chłodno można stwierdzić, że oszczędność paliwa niekoniecznie jest głównym celem „uplastyczniania pojazdów”, może poza PR i działaniami marketingowymi. Podstawową przyczyną wprowadzenia tworzyw jest redukcja kosztów materiałowych, 1 kg stali kosztuje przeciętnie tyle co 2–3 kg tworzywa. Kolejną przyczyną to łatwość przetwórstwa i obróbki. Wtryskiwanie, a obecnie również druk 3D pozwalają otrzymywać gotowe elementy konstrukcyjne bez konieczności spawania ich części, precyzja wytwarzania umożliwia produkcję znacznie bardziej skomplikowanych elementów niż wykonane przez wykuwanie, a estetyka detali z tworzyw istotnie przewyższa estetykę możliwą do nadania elementom z metali czy szkła. Stosowanie tworzyw polimerowych to też zwiększenie elastyczności i nowe horyzonty projektowania.



**Ilustracja 2. Kobieta model 3D; precyzja współczesnych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych**  
**Illustration 2. A woman model 3D; the precision of modern methods of plastics processing**

W rozpoczynającej się erze transportu alternatywnego ogromną rolę odgrywa nowa organizacja przestrzeni pojazdów – stworzenie miejsca dla znacznej objętości akumulatorów w samochodach elektrycznych i hybrydowych oraz nowa, uwzględniająca nowe przeznaczenie (miejsce pracy, wypoczynku lub spotkań) organizacja kokpitów w samochodach autonomicznych. W tym kontekście udział materiałów polimerowych trudno przecenić.

Rosnący udział tworzyw polimerowych w konstrukcji pojazdów to w skali świata wielka oszczędność w zużyciu paliw, a ponieważ ciągle w dominującej części są one pochodzenia mineralnego, to także istotne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Wspomniano wcześniej, że stosowanie tworzyw polimerowych w znacznym stopniu zmniejszyło ciężar opakowań. Uważa się [13], że zastąpienie obecnie stosowanych materiałów opakowań „plastikowych” przez materiały tradycyjne lub alternatywne zwiększyłoby ich ciężar aż 3,6 raza.

Korzystając z dobrodziejstw polimerów, zmniejszamy ciężar środków transportu i przewożonych towarów, tym samym czynimy efektywniejszym sposób poruszania się we współczesnym świecie, co dla człowieka jest niesłychanie ważne ze względów gospodarczych i emocjonalnych.

Ogrzewanie i chłodnictwo mają blisko 40% udział w bilansie energetycznym świata. Wykonane z tworzyw polimerowych izolacje cieplne budynków pozwalają na zmniejszenie zużycia energii wymaganej do ich ogrzania, nawet o 70%. W środkowej Europie dzięki izolacjom termicznym ze spienionego polistyrenu (szkoda, że, z powodu zakazu stosowania freonów, nie ze sztywnych pianek poliuretanowych, jeszcze mniej przenikalnych dla ciepła) i wysokoefektywnym oknom z „plastiku” coraz powszechniejsze są domy 3L zużywające 3 dm<sup>3</sup> oleju grzewczego na 1 m<sup>2</sup> powierzchni rocznie [13].

We wspomnianych zastosowaniach tworzyw polimerowych nie da się zastąpić, a przeciwnicy antropogennego CO<sub>2</sub> w energooszczędnym budownictwie mogą dodatkowo odnaleźć ogromne ograniczenie jego emisji.

Farmy wiatrowe, panele solarne i fotowoltaiczne to przetworniki energii odnawialnej, które w najbliższej przyszłości mają złagodzić deficyt energetyczny świata. Kompozyty poliestrów, poliamidów i poliuretanów to jedyne materiały mogące zapewnić odpowiednie właściwości mechaniczne, odporność na działania otaczającego środowiska i, wynikającą z nich, trwałość w warunkach i kolumnom wiatraków działających w zróżnicowanych warunkach. „Plastiki” to też pokrycia, izolacja i wodoszczelna bariera ogniw solarnych i fotowoltaicznych.

## Woda

Ruediger Baunemann, dyrektor generalny Plastic Europe Deutschland, w swoich artykułach dotyczących niezastępowalności tworzyw polimerowych w realizacji globalnych strategii ekologicznych i rozwojowych podkreślał rolę „plastików” w ochronie wody i zmniejszeniu

jej zużycia [13]. Znaczny wzrost populacji, industrializacja, a przede wszystkim urbanizacja świata w istotnym stopniu zmniejszyły dostępne zasoby świeżej wody. Tu warto podkreślić, że Polska (co wynika także z uwarunkowań geograficznych), pod względem zasobów wody czystej (3000 m<sup>3</sup>) zajmuje w Europie odległe miejsce.

W celu ochrony zasobów wód powierzchniowych i gruntowych jest konieczne ograniczenie konsumpcji, uwarunkowane zrównoważonym zarządzaniem ściekami i, przede wszystkim, działaniem sprawnych, rozgałęzionych i elastycznych systemów zaopatrywania w wodę. „Plastikowe”, obojętne chemicznie i zachowujące wszelkie standardy wody pitnej rury pozwalają na transport wody na duże odległości, stanowią jednocześnie skuteczną jej ochronę przed zanieczyszczeniem. Sięgająca 100 lat trwałość takich rur gwarantuje szczelność i brak strat cennego medium w czasie transportu. To samo (z zamianą cenne na niebezpieczne) dotyczy systemów odprowadzania ścieków. Podobnie, zbiorniki z tworzywa polimerowego zabezpieczają możliwości przechowywania czystej wody przez długi czas bez pogorszenia jej jakości. Niezastąpionym dziś narzędziem do odzyskiwania czystej wody ze ścieków są układy membranowych filtrów wykonanych z tworzyw polimerowych. Dzięki ich zastosowaniu jest możliwy niemal zamknięty obieg wody w największych nawet kompleksach przemysłowych.

## Zdrowie

Zachowanie sterylnych warunków działania to warunek od zawsze determinujący możliwości medycyny, w tym przede wszystkim chirurgii. Opakowania „plastikowe” utrzymują narzędzia chirurgiczne w gotowości do użycia, bez konieczności ich sterylizacji. Blisko 170 lat upływa od chwili wynalezienia przez Charleasa Pravaza i Aleksandra Wooda strzykawki z igłą o małej średnicy, umożliwiającą iniekcje podskórne, jednak świadomość roli jej sterylności dojrzała przez ponad 100 następnych lat. W 1946 r. firma Chance Brothers wypuściła na rynek pierwsze szklane strzykawki z wymiennym tłokiem, co pozwoliło na ich masową sterylizację. Już 3 lata później w Adelajdzie (Australia) Charles Rothauser wyprodukował strzykawkę z polietylenu, niestety miękącą w warunkach wyjaławiania. Kolejna strzykawka Rothausera, wytworzona metodą wtryskiwania z polipropylenu, spełniała wymogi ówczesnie stosowanej sterylizacji, podobnie jak opatentowane przez Colina Murdocha (1956 r.), Bectona Dickinsona (1961 r.) i Phila Brooksa (1974 r.) kolejne generacje plastikowych Disposable Syringes.

Rozwój wirusologii spowodowany rozprzestrzenieniem się w wyniku zakażenia krwią (bez możliwości jakiegokolwiek kontroli) śmiertelnych chorób wirusowych (wirusowe zapalenie wątroby typu B, HIV, czy wreszcie wywołana przez nietypowe białka choroba Creutzfeldt-Jakoba) uzmysłowił światu medycznemu, że konwencjo-

nalna sterylizacja termiczna jest bezskuteczna. Dało to początek erze poliolefinowych strzykawek jednorazowych, sterylnych, dostępnych i tanich. Ich pojawienie się na rynku pozwoliło na znaczne ograniczenie przenoszenia zakażeń krwiopochodnych w jednej z grup największego ryzyka – narkomanów. Przewrót w ochronie zdrowia dokonany przez masowe wprowadzenie strzykawek jednorazowych jest dobrą okazją do zastanowienia się nad rolą artykułów jednorazowego użytku w szeroko pojętej higienie życia. Wielkie imprezy masowe, fast foody w przeludnionych miastach, konsumpcja wszędzie tam, gdzie nie ma możliwości lub gwarancji skutecznego umycia sztućców, naczyń lub nawet pojemników do transportu, jednocześnie rosnący deficyt wody, szybki wzrost populacji, znaczne przyspieszenie przemieszczania się (podróżowania), nawet na wielkie odległości (co sprzyja przenoszeniu się infekcji i chorób), skazują nas na używanie jednorazowych przyborów do jedzenia (może poza słomkami, bez których świat może się obyć). Jak pokażę dalej, zastąpienie najbardziej odpowiednich do ich wytwarzania tworzyw poliolefinowych innymi materiałami jedynie pogłębi problem zarządzania powstałymi odpadami.

Konwencjonalne tworzywa polimerowe to także materiał budulcowy niezliczonych elementów wyposażenia szpitali i laboratoriów medycznych, aparatury diagnostycznej i pomiarowej. To szczelne, lekkie i wygodne opakowania farmaceutyków w każdej postaci.

W ostatnich latach nastąpiła szeroka implementacja polimerów biodegradowalnych w aplikacjach biomedycznych. Rozpuszczalne nici chirurgiczne, inżynieria tkankowa, tymczasowe implanty, stenty, środki gojące rany, sztuczna skóra, a w przyszłości – wydrukowane w systemie 3D – trzustka czy serce, wreszcie wchłaniające się nośniki leków to tylko najważniejsze zastosowania biodegradowalnych materiałów polimerowych we współczesnej medycynie i farmacji.

### CZY TWORZYWA POLIMEROWE MOŻNA ZASTĄPIĆ?

Główne uderzenie w wojnie wypowiedzianej „plastikom” przez ekowojowników, media żywiące się negatywną sensacją i protestami, uległych im polityków i administratorów gospodarki zostało skierowane na opakowania (kilka lat temu) i zastawę stołową jednorazowego użytku (obecnie).

To butelki po napojach porzucone byle gdzie przez nieodpowiedzialnych brudasów, torebki foliowe przenoszone wokół przez podmuchy wiatru, słomki, łyżeczki, widelce i nożyki, kubeczki i tacki towarzyszące otoczeniu miejsc piknikowych, imprez masowych, uzdrowiskowych promenad i niechlujnie sprzątej miejskiej ulicy, wreszcie torby ze śmieciami świadomie porzucone na poboczach dróg, w lesie i na łące są przedmiotem kontestacji i oburzenia obywatela świadomego wyzwania ochrony środowiska XXI w. – bardzo często tego samego, który był bez-

pośrednim sprawcą naruszenia jego nietykliwości. Worki ze śmieciami, pozostawione wraz z zawartością we wrażliwych miejscach krajobrazu i symbolizujące inwazję „plastików” na środowisko, są szczególnym wyrazem zakłamania próśrodkowej propagandy. Przecież właśnie ów worek swoją trwałością, spójnością i nieprzepuszczalnością chroni środowisko przed agresją, niemal zawsze o wiele bardziej niebezpiecznej, swojej zawartości, i jako byt spójny stwarza szansę na w miarę proste oczyszczenie środowiska przez odpowiednie służby (w czasie swoich wędrówek górskich i leśnych wielokrotnie obserwowałem porażające skutki porzucania w interiorze odpadów w torbach biodegradowalnych lub papierowych).

Nie jest więc prawdą, że powszechne używanie tworzyw polimerowych, w większości zastosowań współcześnie niezastąpionych, jest bezpośrednią przyczyną gigantycznego zanieczyszczenia środowiska i że, jak to się formułuje w proekologicznych wypowiedziach i tekstach, „plastiki” rozpraszają się w środowisku. Na obecnym etapie rozwoju technologii nie mają takiej witalności. Niezależnie od źródeł zanieczyszczeń „mikroplastikami”, za wszystkie widzialne dla oka zanieczyszczenia środowiska odpowiada styl (a właściwie jego brak) życia człowieka.

Począwszy od 1992 r. w jaskrawej propagandowej otoczce 22 kwietnia obchodzony jest Światowy Dzień Ziemi. Dzieci i młodzież szkolna, celebryci, politycy i zwykli wolontariusze tłumnie ruszają oczyszczać środowisko. Wieczorem w blasku reflektorów media prezentują sterty zebranych odpadów (to łatwiej zademonstrować niż stopień dokonanego oczyszczenia), niestety w większości „plastikowych”. W poczuciu dobrze spełnionego (niekoniecznie przez nas) obowiązku kładziemy się spać z nadzieją, że *Od jutra już świat...* [14].

Mijają dni i wszystko wokół wygląda jak zawsze. Czyżby tak wielu było wśród nas tych Innych, Złych, Wrogów zrównoważonego rozwoju? Wspaniały Konstanty napisał w *Balu w Operze: Jadą ze wsi wozy apro-wizacyjne, jadą na wieś wozy asenizacyjne...* [15]. Jeżeli pod pojęciem wsi rozumiemy nieurbanizowane środowisko naturalne, to nasz stosunek do niego możemy traktować jako niezmienny, trwały w czasie.

Kolokwialne powiedzenie, doskonale sprawdzające się w historii myśli społecznej głosi, że każdy problem można rozwiązać metodą andegawerską lub pruszkowską. Może zatem spróbować, obok miękkiej, spektakularnej, entuzjastycznej metody edukacyjnej (miarą skuteczności takiej metody są w Warszawie liczne psie kupy wokół tabliczek *Posprzątaj po swoim psie*) spróbować metod restrykcyjnych? W jednym z najgęściej zaludnionych miast świata – Singapurze – obowiązują trzy zakazy: śmiecenia, żucia gumy na ulicy i jedzenia w metrze. Grzywny za tak sformułowane wykroczenia w wypadku recydywy przekraczają tysiąc dolarów. Skutek – na trotuarach miasta trudno znaleźć charakterystyczny ślad gumy do żucia.

Nie wierzę w wychowawcze działania kary, natomiast wierzę w jej funkcję zapobiegawczą, szczególnie jeśli jest





Ilustracja 3. Trwałość PET, jakoby przyczyna zagrożenia życia w morzach i oceanach, wykorzystana dla ich zdobywania; 18-metrowy katamaran *Plastiki* zbudowany z 12,5 tys. butelek z PET, na którym David de Rothschild wraz z pięcioma załogantami pokonał 15 tys. km pomiędzy wybrzeżami Australii i USA w niecałe 130 dni w EKO-rejsie, proteście przeciwko zanieczyszczeniu oceanów

Illustration 3. The durability of PET, an alleged reason for the state of emergency of the oceanic and maritime life, used for battling Pacific challenges. 60-foot catamaran „Plastiki” made out of 12500 reclaimed PET bottles, on which David de Rothschild with a crew of five in eco-expedition in protest against the pollution of oceans beat in 130 days the distance of 15.000 km between USA and Australia

ona bezwzględnie egzekwowana. Zwolnienie z odpowiedzialności wszystkich zanieczyszczających środowisko w wyniku ograniczenia lub zakazu stosowania materiałów polimerowych (np. opakowaniowych), którymi mogłyby je zanieczyszczać, będzie karą niewspółmiernie większą. Karą dla producentów za rozwój w wytwarzaniu materiałów barierowych, karą dla niewielkich przetwórców za znalezienie efektywnych metod ich przetwórstwa do opakowań odpowiadających wymogom współczesnej ochrony żywności i jednorazowych zastaw, gwarantujących higieniczne żywienie na imprezach masowych, wreszcie karą dla nas wszystkich, którzy z tych dobrodziejstw korzystamy.

### PAPIEROWA PRZYSZŁOŚĆ

Ostatnia burza informacyjna na temat zanieczyszczenia oceanicznych wybrzeży Azji Płd. i Płd.-Wsch. odpadowymi opakowaniami z tworzyw polimerowych i równolegle wszczęta histeria dotycząca wszechobecności „mikroplastików” uruchomiły kampanię na rzecz renesansu opakowań z papieru.

Spróbujmy odpowiedzieć na pytanie czy *come back* papieru, jako dominującego materiału opakowaniowego

żywności, jest w ogóle możliwy i czy jego renesans byłby przyjazny środowisku naturalnemu Ziemi.

Od czasu masowego zastąpienia papieru przez bardziej przyjazne opakowania „plastikowe”, głównie z poliolefin, zmieniły się metody jego pozyskiwania, natomiast charakterystyka użytkowa materiału pozostała praktycznie niezmienną. Oznacza to brak istotnych właściwości barierowych wobec wody i tlenu oraz nie najlepsze właściwości mechaniczne. Konsekwencją tego jest fakt, że opakowanie z papieru o zbliżonej gęstości i tej samej funkcjonalności, co opakowanie z poliolefin jest blisko 4 razy cięższe, co wiąże się z 2,2 raza większym wydatkiem energii na jego produkcję i towarzyszącej mu 2,7 raza większej emisji gazów cieplarnianych [13]. Spektakularnym przykładem skuteczności ochrony barierowej opakowania z papieru może być klasyczna długa torba z supermarketu, w której bagietka po 24 godz. osiąga sztywność kija bejsbolowego. Oczywiście właściwości papieru można modyfikować – dodatkiem metalu i tworzyw polimerowych (Tetrapaki), lub tylko tworzyw, ale wtedy „papier” przestaje być przyjaznym środowisku i podatnym na recykling lekiem na całe zło.

A czy papier jest naprawdę przyjazny dla środowiska naturalnego? Na początku był las. Potem las żywił czło-

wieka. Na kolejnym etapie rozwoju człowiek zaczął eksploatować las. Czas na etap, kiedy człowiek zacznie żyć las, bo... jeśli pominąć jego piękno, niezbędność dla równowagi ekosystemów, podtrzymania i rozwoju świata zwierząt i szaty roślinnej, ograniczyć się jedynie do wszechobecnej kalkulacji bilansu CO<sub>2</sub>, to można stwierdzić, że 1 ha lasu sosnowego w wieku 80–100 lat akumuluje rocznie 150 t węgla, najwięcej CO<sub>2</sub> pochłaniają drzewa 65–100 letnie (np. 80-letni buk 20 kg/r., 95-letni dąb – 18 kg/r.) [16]. Od 2005 r. na Ziemi ilość pochłanianego przez lasy CO<sub>2</sub> maleje. Dzieje się tak z powodu stale zmniejszającej się powierzchni obszarów leśnych, szczególnie w krajach Europy Zachodniej, Kanadzie, Rosji w wyniku wycinki młodych i dużych drzew i zastępowania ich młodnikami o dużo mniejszej zdolności pochłaniania CO<sub>2</sub>, w wyniku ochrony lasu przed szkodnikami owadziemi, wreszcie w wyniku bardzo licznych ostatnio pożarów spowodowanych przez człowieka [17]. W Brazylii z kolei wycina się ogromne obszary lasów pod uprawę trzciny cukrowej do produkcji „proekologicznego” paliwa – etanolu. W Kanadzie już w pierwszym dziesięcioleciu XXI w. alarmowano, że jej zasoby leśne, jedne z największych w świecie, stają się, netto (pożary), źródłem zwiększenia śladu węglowego w atmosferze. Spalanie drewna z dużych drzew (to najlepiej spalająca się i najłatwiejsza do pozyskania biomasa) w kotłach kompleksów energetycznych w celu uzyskania zielonego wsadu to kolejny humbug ekologiczny. Wprawdzie ogranicza ono emisję CO<sub>2</sub>, ale równocześnie jest istotnym udziałowcem smogu („ustawa krakowska” zabrania spalania w domowych piecach i kominkach nie tylko węgla, ale i drewna).

Papier, którego powszechnym stosowaniem w opakowaniach chcemy uzdrawiać środowisko naturalne jest jednym z największych LASOŻERCÓW.

Nowoczesne technologie druku i mechanizacja wycinki lasów spowodowały, że papier stał się tanim nośnikiem informacji i tanim materiałem opakowaniowym. 42% przemysłowej wycinki lasów na Ziemi jest przeznaczona na produkcję papieru [18]. Skalę tej zależności mogą uzmysłowić dwa przykłady z USA: oszacowano [19], że niedzielne wydanie gazet amerykańskich (2013 r.) wymagało w każdym tygodniu wycinki 500 000 drzew, z kolei w USA w 2006 r. wycięto 6,5 mln drzew z przeznaczeniem na wyprodukowanie 16 mld kubeczków do kawy, na które zużyto 15 mln m<sup>3</sup> wody i wytworzono ponad 120 mln t odpadów [20, 21]. W ciągu ostatnich 40 lat globalne zużycie papieru wzrosło o 400%, a jego roczna produkcja sięgnęła 400 mln t. Zgodnie z danymi Environmental Paper Network największymi konsumentami papieru *per capita* są: USA – 315 kg/r., Europa Zach. – 180 kg/r., Australia – 135 kg/r.; w Chinach, Indiach i krajach Azji Płd.-Wsch. obserwuje się natomiast najbardziej dynamiczny przyrost rocznego zużycia papieru na osobę [18].

Zmniejszenie pojemności „zielonych płuc” Ziemi to niestety niejedyny aspekt negatywnego oddziaływania masowego stosowania papieru i kartonu. Jego produkcja i użytkowanie wywierają szereg niekorzystnych dla środowiska

oddziaływań, określonych ogólnie jako **zanieczyszczenia papierem**. Papiernie zatruwają powietrze, wodę i glebę. Pomimo segregacji zużyty papier jest głównym składnikiem większości składowisk, stanowiąc ok. 35% masy odpadów stałych [22]. W tym kontekście rozpowszechniany przez producentów opakowań papierowych pogląd o recyklingu ich wyrobów, zdecydowanie przewyższającym recykling „plastików”, jest równie wiarygodny, jak stary brytyjski dowcip o rozpoznawalności z lotu ptaka jednego z regionów wysp po suszącym się na płotach papierze toaletowym. Z kolei procesy recyklingu papieru są poważnym źródłem zanieczyszczeń – niebezpiecznych szlamów powstających w procesie odbarwiania.

W USA przemysł papierniczy jest czwartym co do wielkości udziałowcem w emisji gazów cieplarnianych, ilość emitowanego przez niego CO<sub>2</sub> stanowi 9% emisji z całego sektora przemysłowego [18]. Jednocześnie papiernie w skali świata są klasyfikowane jako piąty pod względem wielkości konsument energii, co odpowiada 4% jej globalnego zużycia.

Produkcja papieru jest źródłem znacznych ilości wielu szkodliwych gazów. W procesie otrzymywania miążgi celulozowej, zarówno metodą siarczanową, jak i siarczynową, do atmosfery jest wydzielany SO<sub>2</sub> (np. papiernie Kanady w 2006 r. do atmosfery wyemitowały 60 000 t SO<sub>2</sub>) [23], któremu w procesie siarczanowym towarzyszą siarkowodór, merkaptan metylowy i disiarczki węgla, będące źródłem uporczywego odoru. Miążgę pochodzącą z obydwu wymienionych procesów przez wiele lat wybielano przy użyciu chloru i związków chlorowych. Fabryki stosujące do delignifikacji czysty chlor emitowały duże ilości dioksyn, które w istotnym stopniu zredukowano w wyniku zastąpienia Cl<sub>2</sub> ditlenkiem chloru (ClO<sub>2</sub>). Obecnie coraz większa liczba producentów papieru realizuje wybielanie pulpy z zastosowaniem Elementary Chlorine Free (ECF) i Totally Chlorine Free (TCF). Procesy ECF stanowią 93,9% współczesnych procesów papierniczych, natomiast 4,7% to procesy TCF [24]. Najnowocześniejsze z nich charakteryzują się emisją chlorowęglowodorów poniżej 0,05 kg na 1 t wyprodukowanej pulpy [24]. Ciągle jeszcze nie udało się zredukować emisji dioksyn do zera.

#### TWORZYWA BIODEGRADOWALNE, ALE NIE W PORĘ

W świetle danych dotyczących źródeł surowcowych do produkcji papieru i metod jego otrzymywania trudno, w jakimkolwiek aspekcie ekologicznym, uznać go za zastępnik opakowaniowych poliolefin. Producenci opakowań szermują wprawdzie argumentem znacznie sprawniejszego recyklingu papieru w porównaniu z odzyskiem tworzyw opakowaniowych, jednak dotyczy to przede wszystkim gazet, materiałów informacyjnych, kartonu, a w ostatniej kolejności papierowych toreb zanieczyszczonych żywnością. A poza tym, co z tego „sprawnego” recyklingu wynika dla stanu środowiska

T a b e l a 1. Porównanie użytków i oddziaływania na środowisko procesów wytwarzania toreb zakupowych<sup>\*)</sup>T a b l e 1. Comparison of land use and environmental impact of shopping bag manufacturing processes <sup>\*)</sup>

	Torby polietylenowe (masa = 6 kg)	Torby papierowe (masa = 52 kg)	Torby wielokrotnego użycia z włókniny polipropylenowej (masa = 42 kg)		Torby wielokrotnego użycia z polietylenu o zawartości 40% recyklatu	
	1 użycie	1 użycie	1 użycie	8 użyc	1 użycie	8 użyc
Nieodnawialna energia zużyta w produkcji, GJ	763	2620	3736	467	2945	368
Emisja gazów cieplarnia- nych w procesie produk- cji, ekwiwalent (1 t CO <sub>2</sub> = 0,010)	0,040	0,080	0,262	0,033	0,182	0,023
Konsumpcja świeżej wody (0,45 dm <sup>3</sup> = 10)	58	1000	426	85	250	40

<sup>\*)</sup>Dane w tabeli odniesiono do 1000 toreb, z wyjątkiem świeżej folii polietylenowej – w tym wypadku, ze względu na bardzo małą masę pojedynczego opakowania, dane odniesiono do 1500 toreb.

<sup>\*)</sup>The data in the table refers to 1000 bags, except for fresh polyethylene film – in this case, due to the very low weight of a single package, the data was referred to 1500 bags.

naturalnego Ziemi, skoro skala wycięcia lasów na potrzeby produkcji papieru stale rośnie?

Bardzo dobrą puentą nieudolnych prób powtórzenia inwazji toreb papierowych w masowym handlu detalicznym jest elegancka analiza przedstawiona przez Josepha Greena z Research Foundation, California State University w Chico, porównująca użytki niezbędne do wytworzenia opakowań i oddziaływanie procesu ich otrzymywania na środowisko w odniesieniu do folii polietylenowej, papieru, włókniny polipropylenowej i folii polietylenowej o zawartości 40% recyklatu (tabela 1).

Dbałość o czystość toreb papierowych i unikanie ich przeciążania może pozwolić na dwa lub trzy dodatkowe użycia, co poprawiłoby nieznacznie wskaźniki z tabeli 1, ale na pewno nie uczyni ich konkurencyjnymi (sam mam doświadczenia z bezproblemowym, blisko dwudziestokrotnym użyciem toreb z taśmy polipropylenowej). (...) *Choć zmieniać świat i zwalczać zło – Niezmiennie był gotowy, Stał ciągle wśród zabawek, bo on był tylko papierowy (...) i poszedł w ogień ... Zginął w mig. Żołnierz papierowy* (Bułat Okudźawa „Papierowy żołnierz”).

Sценка przy straganie rybnym: sprzedawczynie podaje klientowi nieopakowaną tuszę okazałego tuńczyka, klient: *Can I have a plastic bag, please?*, sprzedawczynie: *Oh, it's already inside!* Ten popularny ostatnio w Internecie dowcip z pewnością bawi ekowojowników, jest również źródłem dobrego samopoczucia beneficjentów European Bioplastics (europejskie stowarzyszenie producentów „bioplastików”). Nie śmieszyłby na pewno kaczkę, kormorana czy mewę dławiającą się foliową torebką, ryb, walenia czy żółwi morskich, w których układach pokarmowych zalegają mikrogranulki czy fragmenty opakowań z „plastiku”. Dla ich tragedii nie ma znaczenia etykieta określająca rodzaj tworzywa: poliolefin, poliolefin z dodatkiem prooksydanta czy tworzywo biodegradowalne. Wymienione polimery są **jednakowo niebezpieczne**, bo czas ich całkowitego rozkładu w środowisku, chociaż nieporównywalny (setki lat dla poliolefin, lata dla po-

zostałych), jest zawsze zbyt długi – tak wobec zdarzeń nagłych, jak i z punktu widzenia okresu oddziaływania na organizmy, które je pochłonęły. Układy trawienne żółwi morskich – zielonego (*chylonia midas*) i kareta (*caretta caretta*) dostarczyły spektakularnego dowodu na brak pokrycia deklaracji producentów materiałów z przyrostkiem degradowalne, dotyczących szybkości degradacji. Wyniki badań Müllera i współpr. [25], cytowane również w ONZ-owskim raporcie Biodegradable Plastics & Marine Litter [26], wykazały, że torby zakupowe wykonane z HDPE i oksydegradowalnego PE (prooksydant d2w<sup>TM</sup>) w przeciągu 49 dni (czas trwania standardowej procedury testowej) ulegają jedynie śladowej degradacji w organizmach obydwu zwierząt, w wypadku biodegradowalnej torby z modyfikowanej skrobi termoutwardzalnej (MaterBi<sup>TM</sup>, wyprodukowana przez BioBag) postęp degradacji wynosił 8,5% w organizmie żółwia zielonego i 4,5% w organizmie żółwia karety.

Biodegradowalność (kompostowalność) jest definiowana przez szereg międzynarodowych i narodowych standardów, między innymi ISO 17088, ASTM 6400 i EN 13432. Wszystkie one odpowiadają warunkom degradacji w przemysłowym kompostowniku, w którym temperatura sięga 70 °C. Norma europejska (EN 13432) jako biodegradowalny określa materiał, który w ciągu 6 miesięcy w co najmniej 90% ulega rozkładowi do CO<sub>2</sub> i którego pozostałość po upływie 3 miesięcy kompostowania w stopniu nie większym niż 30% odpowiada frakcji sitowej >3 mm.

W odniesieniu do strategicznego celu stosowania materiałów biodegradowalnych – znikania odpadów opakowaniowych zanieczyszczających lądy i morza Ziemi, a więc szerokiego zakresu użyteczności, powyższa definicja jest pojęciem pustym. Nie zawiera bowiem odniesienia do miejsca, w którym rozkład do CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (lub metanu) ma zachodzić i przy udziale jakich czynników środowiskowych – w przemysłowym kompostowniku (wysoka temperatura ≥58 °C, udział bakterii i grzy-

bów), w kompostowniku przydomowym (temperatura otoczenia, grzyby i bakterie), w glebie (temperatura otoczenia, grzyby i bakterie), w wodzie słodkiej (temperatura otoczenia, bakterie), w wodzie morskiej (temperatura otoczenia, bakterie w małym stężeniu), czy wreszcie w otwartym środowisku (temperatura otoczenia). A zatem, chociaż, jak to pokazały wyniki badań zainicjowanych przez PlasticsEurope, większość tworzyw opakowaniowych etykietowanych jako biodegradowalne spełnia standardy EN 13432 (lub równoważnych) [27], to nie wynika z tego żadna przesłanka ich bardziej pozytywnego oddziaływania na środowisko naturalne niż konwencjonalnych materiałów polimerowych pochodzenia petrochemicznego. Poszczególne elementy środowiska naturalnego różnią się prawdopodobieństwem występowania kolonii grzybów i bakterii ułatwiających i przyspieszających biodegradację, wilgotnością, niezwykle istotnym dostępem dla promieniowania UV (w wypadku mórz realnym jedynie na linii brzegowej), a przede wszystkim funkcjonują w warunkach niższej temperatury niż panująca w kompostowniku komercyjnym.

Można zatem przyjąć [26, 28], że w ogromnej większości stosowane obecnie opakowania z polimerowych tworzyw biodegradowalnych nie rozkładają się samorzutnie do ditlenku węgla i wody lub metanu w czasie wystarczająco krótkim z punktu widzenia ochrony środowiska. Ba, brak jest dowodów na to, że całkowitemu rozkładowi ulegają kiedykolwiek. Rzeczywistymi produktami degradacji biologicznej są niewielkie fragmenty – „mikroplastiki” właśnie (zgodnie zresztą z intencją zwierzchników autorów odpowiednich standardów narodowych i międzynarodowych), dodatkowo fragmenty, których charakter można określić jako inwazyjny, pojawiają się lokalnie w dużym stężeniu w stosunkowo krótkim czasie. Odróżnia to je w istotnym stopniu od bardzo niewielkich ilości „mikroplastików” pochodzenia petrochemicznego, wypłukiwanych mozolnie przez wodę, ścieranych w środowisku, czy erodowanych w wyniku ruchu mas powietrza, przez dziesiątki czy nawet setki lat. Półzartem można stwierdzić, że mikrogranulki PET, identyfikowane w organizmach zwierząt morskich, pochodzą z butelek do taniego piwa konsumowanego w czasach Jana Chryzostoma Paska.

Odpady biodegradowalnych tworzyw polimerowych powinny być zbierane selektywnie i kierowane do dedykowanych im kompostowników, ponieważ odpady rozkładalne anaerobowo nie ulegają degradacji w kompostowniku aerobowym, i odwrotnie. Z kolei obecność polimerów biodegradowalnych w strumieniu odpadowym poliolefin będzie utrudniała przetwórstwo i w istotnym stopniu wpływała na pogorszenie jakości otrzymywanych recyklatów.

Tak jak w dyskusji nad opakowaniowymi zastosowaniami papieru, w wypadku polimerowych materiałów biodegradowalnych także warto przeanalizować bilans energetyczny w kontekście doktryny zrównoważonego rozwoju, wynikającej z niej koncepcji gospodarki o obie-

gu zamkniętym, a przede wszystkim ewidentnego deficytu energetycznego świata. Otóż degradacja aerobowa bezpośrednio w środowisku naturalnym lub w kompostowniku komercyjnym to wypuszczanie w przestrzeń energii zawartej w rozkładanych odpadach, nazywane często syndromem ucieczki entropii. Ilość bezpowrotnie traconej energii jest wcale niemała. W odniesieniu do typowego masowego tworzywa polimerowego, jakim jest polietylen, przyjmuje się, że na poszczególne etapy wytwarzania wyrobu z PE przypada następujący wydatek energii (jedn. wzgl.): destylacja frakcji naftowej z surowej ropy – 9, piroliza (reforming) nafty do etylenu – 21, polimeryzacja etylenu – 10, przetwórstwo polietylenu – 17, łącznie – 57. Proste spalanie odpadu z tak otrzymanego wyrobu, dodajmy najmniej chyba korzystna forma odzysku energii, dostarcza 43 jednostek. PlasticsEurope oszacował, że energia zawarta w jednorazowej torebce z supermarketu jest równoważna energii wydatkowanej na świecenie żarówki o mocy 40 W w ciągu 7 min. W wypadku tworzywa pochodzenia biologicznego nakład energetyczny na otrzymanie polimeru może być nieco mniejszy ze względu na znaczne wykorzystanie do jego otrzymania sił natury, ale z kolei wydatek energetyczny związany z przetwórstwem (np. polihydroksyalkanianów) jest większy. Ze względu na wymaganą skalę produkcji opakowań ulegających takiej degradacji (dziesiątki milionów ton) marnotrawstwo energii w skali świata byłoby wprost nie do wybaczenia. Rozkład anaerobowy dostarczający doskonałego nośnika energii – metanu (niestety poza kontrolowanym kompostownikiem  $\text{CH}_4$  musi być traktowany jako **niebezpieczny gaz cieplarniany**, o współczynniku oddziaływania na środowisko 21 razy większym niż  $\text{CO}_2$ ) z punktu widzenia efektywności energetycznej jest korzystniejszy, chociaż zależy to od sprawności kompostowania, czasu jego trwania i czystości produktu. Dobór kolonii drobnoustrojów, skutecznych do anaerobowej degradacji wybranych do masowego stosowania tworzyw biodegradowalnych, będzie jednak trudny, podobnie jak sama organizacja procesu kompostowania i, w dającej się określić perspektywie czasowej, na pewno nie będzie ekonomicznie konkurencyjna w stosunku do standardowych procesów recyklingu opakowań z tworzyw polimerowych.

Wielokrotnie używany w tym rozdziale termin *tworzywa biodegradowalne* odnosi się zwykle zarówno do materiałów pochodzenia syntetycznego odpowiadających naturalnym biopolimerom (przy czym mogą one być produkowane zarówno z surowców mineralnych, jak i biomasy), do biopolimerów wytwarzanych przez naturę (chityna, lignina, celuloza, poliestry nabłonkowe, włókna proteinowe itp.) oraz biowłókien otrzymywanych bezpośrednio w modyfikowanych roślinach bez udziału bakterii (produkcja zainicjowana przez Monsanto w 1996 r. a realizowana również przez Nature Works, Cargill i Dow Chemicals), jak i do **polimerów oksobiodegradowalnych**. Te ostatnie formalnie dopuszczone do stosowania w UE – Parlament Europejski zablokował zgłoszoną przez jego

członków propozycję zakazu stosowania i promowania PAC (*Pro-oxidant Additive Containing, Plastics*) – przechodzą jednak w sferę niebytu. Stało się to w wyniku przedstawienia przez Komisję Europejską raportu „Green Paper on a European Strategy on Plastic Waste in the Environment” [29] identyfikującego liczne problemy związane ze stosowaniem materiałów oksobiodegradowalnych, w tym ich wielce prawdopodobny (zdaniem autora oczywisty) udział w masie „mikroplastików” zalegających w wodach morskich i oceanicznych. W ramach inicjatywy New Plastics Economy, wcześniej już wspomnianej Ellen McArthur Foundation, 5 listopada opublikowano oświadczenie wzywające do **wprowadzenia zakazu stosowania opakowań z tworzyw oksobiodegradowalnych**, którego sygnatariuszami były m.in.: European Bioplastics, British Plastics Federation Recycling Group, Unilever, Pepsi Co., Veolia, World Wildlife Fund (WWF), M&S, Gulf Petrochemicals and Chemicals Association, Plymouth Marine Laboratory, łącznie ponad 150 producentów z różnych etapów łańcucha dostaw tworzyw polimerowych, stowarzyszeń branżowych, organizacji pozarządowych oraz przedstawicieli świata nauki. Wcześniej, w 2015 r., zakaz stosowania takich tworzyw wprowadziła Francja, a brytyjska grupa Tesco wraz z firmami z nią współpracującymi zaprzęstały ich stosowania.

Wnioski z kolejnego raportu Komisji Europejskiej [30] *On the impact of the use of oxo-biodegradable plastic, including oxo-biodegradable carrier bags, on the environment* z 16 stycznia 2018 r. zawierają stwierdzenia: (...) oksodegradowalne „plastiki”, łącznie z torbami zakupowymi, mogą degradować szybciej w otwartym środowisku niż „plastiki” konwencjonalne. Nie ma jednak dowodów na to, że „plastiki” oksodegradowalne będą następnie ulegać całkowitej biodegradacji w odpowiednim czasie w otwartym środowisku, na składowiskach czy w środowisku morskim. Wystarczająco szybka biodegradacja nie została zademonstrowana w szczególności w wypadku składowisk i wód morskich (...) Występuje znaczne prawdopodobieństwo, że fragmenty „plastików” nie będą ulegały pełnej degradacji i będą stwarzały ryzyko przyspieszonego, znaczącego gromadzenia się „mikroplastików”, zwłaszcza w środowisku morskim; oksobiodegradowalne „plastiki” nie są rozwiązaniem dla środowiska i nie są odpowiednie do długoterminowych zastosowań, recyklingu i kompostowania.

Zanieczyszczenia wywołanego kilkuletnim entuzjastycznym stosowaniem opakowań oksobiodegradowalnych (jego rozmiar stale rośnie wskutek obecności jeszcze nierozłożonych i ciągle trafiających do środowiska tworzyw oksobiodegradowalnych) można było uniknąć. Przypomnijmy, tworzywa oksobiodegradowalne to konwencjonalne tworzywa (jak polietylen), modyfikowane dodatkami związków metali przejściowych (głównie Mn, Co, Cu, Fe, itp.), działających jako katalizator albo prooksydant (inicjator utleniania), w celu zwiększenia szybkości początkowego utleniania i fragmentacji [31]. Początkowy rozpad prowadzi do powstania wielu

małych fragmentów (to właśnie „mikroplastiki”), które dalej mają ulegać degradacji mikrobiologicznej. Cel zastosowania katalizatora/prooksydanta można zatem zdefiniować jako zwiększenie dostępności przeznaczonego do rozkładu materiału przez wielokrotne rozwinięcie jego powierzchni, dostępnej do tworzenia biofilmu drobnoustrojów, będącego wstępem do biotransformacji. Już w początkowym okresie intensywnego promowania szerokiego wprowadzania opakowań oksobiodegradowalnych wielokrotnie zwracano uwagę na niejasne losy w środowisku naturalnym mikrofragmentów tworzyw [32–34], brak powtarzalności rozpadów w różnych środowiskach [27] oraz ich nieprzydatność do konwencjonalnych metod recyklingu (pogorszenie jakości recyklatu ze względu na zawartość prooksydantów). Thomas i współpr. [34] rekomendują spalanie jako najbardziej efektywne rozwiązanie problemu zakończenia życia (*end-of-life*) „plastików” oksobiodegradowalnych. W unijnym raporcie [30], na podstawie bardzo obszernej analizy danych literaturowych, udokumentowano, że tworzywa te nie nadają się również do kompostowania. Zdaniem twórców raportu „plastiki” okso- należy wykluczyć zarówno jako wsad do kompostowania, jak i z jakichkolwiek zastosowań w realizacji procesu, w tym jako materiał konstrukcyjny pojemników na odpady organiczne, co było szeroko zalecane wcześniej.

Osobnym zagadnieniem jest depozyt katalizatorów/prooksydantów, pozostających w środowisku po biodegradacji. Wprawdzie w cytowanych kilkakrotnie opiniach nie stwierdzono bezpośredniego szkodliwego oddziaływania na dżdżownice czy ryby, ale nie ulega wątpliwości, że jony manganu, kobaltu czy miedzi, gromadzące się w wodach gruntowych lub morskich w ilościach odpowiadających pierwotnie planowanej skali stosowania materiałów oksobiodegradowalnych w zastosowaniach opakowaniowych, stanowią istotne zagrożenie dla środowiska.

Wykorzystanie wszystkich tworzyw polimerowych, etykietowanych jako biodegradowalne, pogłębia społeczny problem zaśmiecania środowiska, wobec którego, jak wcześniej wspominałem, świat jest bezradny od dawna. Zdecydowana większość społeczeństwa traktuje biodegradowalność odpadu jako innowację zwalniającą jednostki od odpowiedzialności za porzucanie odpadów, gdziekolwiek [35]. Świadomość obniżenia poziomu odpowiedzialności zwalnia także innych z aktywności w przeciwdziałaniu takim zachowaniom. Potwierdziło to m.in. badanie zachowań młodych ludzi w Los Angeles, wykazujące zwiększenie śmiecenia jako najbardziej prawdopodobną reakcję na kontakt z opakowaniami opatrzonymi etykietą – biodegradowalne [36].

W znakomitej monografii „Developments in plastic materials for packaging food, beverages and other fast moving consumer goods” [37], T.A. Cooper tak podsumował najważniejsze uwarunkowania realnego zastępowania tworzyw polimerowych pochodzenia petrochemicznego przez biopolimery:

– ceny monomerów, polimerów i innych chemikaliów wchodzących w skład bioplastików muszą osiągnąć poziom w najgorszym wypadku równy cenom ich odpowiedników konwencjonalnych (szansę na to Cooper upatruje w systematycznym ostatnio wzroście cen ropy). Na razie cena stosunkowo taniego, ale pozbawionego podstawowych właściwości barierowych polilaktydu (PLA) wynosi mniej niż 2 USD za 1 kg, ale polihydroksyalkaniany, wykazujące znacznie bardziej interesujące właściwości barierowe, kosztują ok. 4 USD za 1 kg, co odpowiada cenie poliwęglanów;

– produkcja biopolimerów w żadnym aspekcie nie może konkurować z produkcją żywności;

– zwiększenie efektywności produkcji roślin – źródła biomateriałów – wymaga istotnie większego zaangażowania genetycznej modyfikacji dla ochrony plonów, zwiększenia wydajności i redukcji kosztów upraw i wyodrębnienia z biomasy chemikaliów i biomateriałów;

– w wypadku masowego stosowania biopolimerów muszą być przygotowane (podobnie jak w wypadku tworzyw pochodzenia petrochemicznego) efektywne sposoby recyklingu i innych metod ostatecznego wykorzystania odpadów: kompostowanie i fermentacja anaerobowa materiałów biodegradowalnych, albo przerób do paliw lub energii – tworzyw nierecyklowalnych.

Jak pamiętamy, takie same warunki, z wyjątkiem ostatniego, stawiono biopaliwom I generacji. Dla lansowanych w Europie bioestrów zakończyło się to bezprzykładną klęską (ostatnia dyrektywa UE ogranicza ich dodatek do paliw do 6%). T.A. Cooper pominął inne istotne uwarunkowania, np. ślad węglowy procesów wytwarzania tworzyw biodegradowalnych, który przy obecnym poziomie technologii wytwarzania i przetwórstwa nie jest wyraźnie korzystniejszy niż tworzyw konwencjonalnych. T.A. Cooper konkluduje ostatecznie: *szersza implementacja „bioplastików” jest adresowana do spełnienia wymagań społecznych, politycznych i środowiskowych, a nie do wymagań techniki, które zostały satysfakcjonująco spełnione przez tworzywa pochodzenia petrochemicznego*. W pełni identyfikuję się z takim poglądem, niech strumień biopolimerów najwyższej jakości zostanie skierowany tam, gdzie jest najbardziej potrzebny – w zastosowaniach medycznych, farmaceutycznych i diagnostycznych. Codziennosc, w której zachowanie biopolimerów, dopiero po znacznym upływie czasu, istotnie różni się od zachowania tworzyw konwencjonalnych niech pozostanie domeną tanich, dostępnych i niemal doskonałych technicznie konwencjonalnych tworzyw polimerowych.

Nie znaleźliśmy zamiennika „plastików” równorzędnego przynajmniej pod względem właściwości użytkowych, ekonomiczności, a przede wszystkim oddziaływania na środowisko naturalne.

Z pseudoproekologiczną propagandą i promocją omówionych powyżej surogatów poliolefin i ich weryfikacją w praktyce było i jest jak w piosence Agnieszki Osieckiej: *Słowa jak sztuczny miód, ersatz, cholera, nie życie, miał być raj,*

*miał być cud, i ćwiartka na popicie, a to wszystko nie tak, nie to, a jeżeli, a jeśli nie to, no to o co u diabła nam szło... o szkło?* [38]. Szkło tym razem to *lanse* dla polityków, celebrytów i „cierpiących za miliony”, finansowanie prowadzących donikąd niezliczonych projektów, przyjazny zielony PR dla kilku koncernów i krótkotrwałe otwarcie rynku dla niewielkich producentów ersatzu.

Margaryna jak masło – w moim pokoleniu trzeba było wiele samozaparcia, żeby nie weryfikować na sobie słuszności tego hasła. Dziś wspomaga je kardiologicznie poprawna obecność kwasów  $\Omega$ -3 (lepiej wypić łyżkę tranu). **Tworzywa biodegradowalne jak poliolefiny? – Tak, ale tylko w ciemniejszej stronie strefy zastosowań.**

Świat pozostanie przy poliolefinach i innych tworzywach konwencjonalnych. Zbudowaliśmy z nich niemal doskonałą strukturę techniczną naszego świata, ich wszechobecność warunkuje rozwój cyfryzacji, komunikacji, transportu, technologii 4.0, budownictwa i gospodarstwa domowego, ochrony zdrowia i środowiska, wreszcie estetykę naszego świata. Wszystko, co możemy zrobić dla siebie i naszej zrównoważonej ze światem egzystencji, to opanować wreszcie najtrudniejszy w realizacji etap cyklu użytkowego tworzyw polimerowych – życie po życiu.

#### PODZIĘKOWANIA

*Dr inż. Ewie Kijeńskiej-Gawrońskiej bardzo dziękuję za burzliwe dyskusje i pomoc w zbieraniu materiału dowodowego.*

#### LITERATURA

- [1] “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future”, Oxford University Press, Oxford, New York 1987.
- [2] Johansson A.: “Clean Technology”, CRC Press. Inc., Boca Raton, Florida, USA 1992.
- [3] “EU Action Plan for the Circular Economy”, Brussels, Belgium, December 2015.
- [4] Freinkel S.: “A Brief History of Plastic’s Conquest of the World Cheap plastic has unleashed a flood of consumer goods”, Scientific American (online), A Division of Springer Nature America Inc., 2011 (dostęp: 26 czerwca 2019 r.). <https://www.scientificamerican.com/article/a-brief-history-of-plastic-world-conquest/>
- [5] “New Internationalist” (online), New Internationalist Publications Ltd., Oxford, England, 2008 (dostęp: 26 czerwca 2019 r.). <https://newint.org/features/2008/09/01/polymer-revolution>
- [6] Boyd J.E.: “Celluloid: The Eternal Substitute”, DISTILLATIONS, Science History Institute, 2011 (dostęp: 26 czerwca 2019 r.). <https://www.sciencehistory.org/distillations/celluloid-the-eternal-substitute>
- [7] Rhodes J.: “American History Highlights Celluloid and the Dawn of the Plastic Age Read”, Smithsonian.com, 2010 (dostęp: 26 czerwca 2019 r.).

- <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/american-history-highlights-celluloid-and-the-dawn-of-the-plastic-age-139344351/>
- [8] Tullo A.H.: *Chemical Engineering News Archive* **2015**, 93 (45), 37.
- [9] Ferichel S.: "Plastic: The Making of a Synthetic Century", Harper Collins, New York 1996.
- [10] "The New Plastic Economy: Rethinking the Future of Plastics", Ellen McArthur Foundation, WORLD ECONOMIC FORUM, Switzerland 2016.
- [11] Nowak A., Cybulska K.: „Mikroplastik – prawda czy mity? ", 2018 (dostęp: 26 czerwca 2019 r.). <https://www.kigpr.pl/pl/198/313/mikroplastik-prawda-czy-mity.html>
- [12] Tullo A.H.: *Chemical Engineering News Archive* **2006**, 84 (24), 12.
- [13] Baunemann R.: *VIP-Visions in Plastics* **2013**, 4, 6.
- [14] Rybiński A.: „Od jutra już świat będzie mój”.
- [15] Gałczyński K.: „Bal w operze”.
- [16] „Metodyka szacowania Akumulacji CO<sub>2</sub> przez Drzewa”, Fundacja Aeris Futuro, Kalkulator CO<sub>2</sub> (dostęp: 26 czerwca 2019 r.). <https://docplayer.pl/13049737-Kalkulator-co2-metodyka-szacowania-akumulacji-co2-przez-drzewa.html>
- [17] „Oszacowanie strumieni netto dwutlenku węgla wymienianego między ekosystemem leśnym a atmosferą”, Raport z projektu badawczego zamawianego zleconego przez DGLP, Katedra Meteorologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 2012.
- [18] Udeajah R.A., Nche G.C.: *Academic Journal of Interdisciplinary Studies* **2013**, 2 (13), 139.
- [19] "EPA's 2008 Report on the Environment (EPA)", U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment, Washington 2008.
- [20] Feldman H.: "Paper Cups = Unsustainable Consumption", aboutmyplanet.com (dostęp: maj 2008 r.).
- [21] Spitzer N.: "The impact of disposable coffee cups on the environment", sheknows (dostęp: 26 czerwca 2019 r.). <https://www.sheknows.com/home-and-gardening/articles/810025/the-impact-of-disposable-coffee-cups-on-the-environment/>
- [22] "Municipal solid waste in the United States 2005 Facts and Figures", Executive Summary, US Environmental Protection Agency, 2005.
- [23] "2006 Air Pollutant Emissions for Canada (Tonnes)", Environment Canada (dostęp: maj 2008 r.).
- [24] Kowalska M., Donatello S., Wolf O.: "EU Ecolabel criteria for Graphic Paper, Tissue Paper and Tissue Products. Final Technical Report", EUR 29656 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2019, ISBN 978-92-76-00024-2, JRC115764. <http://dx.doi.org/10.2760/71692>
- [25] Müller C., Tounsend K., Matschullat J.: *Science of the Total Environment* **2012**, 416, 464.
- [26] "UNEP (2015) Biodegradable Plastics and Marine Litter. Misconceptions, concerns and impacts on marine environments", United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.
- [27] Deconinck S., De Wilde B.: "Benefits and challenges of bio- and oxo-degradable plastics", Study DSL-1, Final Reports, on behalf of Plastic Europe AISBL, Brussel 2013.
- [28] "The Impact of the Use of Oxo-degradable Plastic on the Environment", Final Report, For the European Commission DG Environment, Framework Contract No ENN.A.Z./FRA/2015/0008, European Union 2016.
- [29] "European Strategy on Plastic Waste in the Environment", Analysis of the public consultation on the green paper, BIO Intelligence Service Final Report prepared for the European Commission, DG ENV, 2013.
- [30] "On the impact of the use of oxo-biodegradable plastic, including oxo-biodegradable carrier bags on the environment", Report from the Commission to the European Parliament and the Council, COM (2018) final, Brussels 16.01.2018. [ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/oxo-plastics.pdf](http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/oxo-plastics.pdf)
- [31] Chellini E., Corti A., D'Antone S., Baciù R.: *Polymer Degradation and Stability* **2006**, 91 (11), 2739.
- [32] Eubeler J.P., Zok S., Bernhard M., Knepper T.P.: *Tr AC Trends in Analytical Chemistry* **2009**, 28 (9), 1057.
- [33] Eubeler J.P., Bernhard M., Knepper T.P.: *Ar AC Trends in Analytical Chemistry* **2010**, 28 (9), 84.
- [34] Thomas N., Clarke J., Mclauchlin A., Patrick S.: EV0422: "Assessing the Environmental Impacts of Oxo-degradable Plastics Across Their Life Cycle", Research Report for the Department of Environment, Food and Rural Affairs, London, UK 2010.
- [35] Klöckner C.A.: *Global Environmental Change* **2013**, 23 (3), 1028.
- [36] "Littering and the iGeneration: City-wide intercept study of youth litter behaviour in Los Angeles", Keep Los Angeles Beautiful (2009), XIII Environmental Psychology Conference, Granada, June 2015. <http://www.congresopsicamb2015.com>
- [37] Cooper T.A.: in "Trends in Packaging of Food, Beverages and Other Fast-Moving Consumer Goods (FMCG)", Woodhead Publishing Limited 2013, str. 108–152.
- [38] Osiecka A.: „Sztuczny miód”.