

**Krzysztof Melski**

Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu

## **OPAKOWANIA BIODEGRADOWALNE JAKO POTENCJALNE ROZWIĄZANIE PROBLEMU ODPADÓW OPAKOWANIOWYCH**

**Streszczenie:** Zastosowanie polimerów biodegradowalnych w opakownictwie stanowi wciąż aktualne, budzące liczne kontrowersje zagadnienie w kontekście ochrony środowiska naturalnego. Szeroki zakres problemów z nim związanych rozciąga się od inżynierii materiałowej i technologii opakowań, poprzez gospodarkę odpadami aż po politykę. Skomplikowany układ współzależności sprawia, że nie ma jednego, optymalnego sposobu rozwiązania problemu zużytych opakowań.

W artykule omówiono podstawowe zagadnienia związane z jedną z dróg rozwiązania problemu – zastosowaniem polimerów biodegradowalnych w szeroko pojętym opakownictwie, ze szczególnym uwzględnieniem problemów z tego faktu wynikających. W pierwszej części zdefiniowano pojęcie i zakres stosowania biopolimerów oraz polimerów i opakowań biodegradowalnych. Następnie omówione zostały procesy biologicznego rozkładu polimerów z zaakcentowanymi czynnikami wpływającymi na przebieg procesu i jego wydajność. Uregulowania prawne dotyczące omawianych zagadnień oraz problemy z zagospodarowaniem omawianej grupy odpadów omówione zostały na kolejnych stronach artykułu. Zwieńczenie tekstu zawiera kilka zdań odnoszących się do społeczno-politycznych aspektów zastosowania wybranej grupy proekologicznych materiałów opakowaniowych.

**Słowa kluczowe:** biodegradacja, biopolimer, kompostowanie, opakowanie.

### **Wstęp**

Jednym z kierunków rozwiązywania problemu odpadów opakowaniowych jest wprowadzenie do powszechnego użytku materiałów, które zachowując właściwości „klasycznych” polimerów, są w pewnym stopniu podatne na atak mikroorganizmów, przez co mogą być poddane przetwarzaniu metodami biologicznymi. Zastosowanie polimerów biodegradowalnych może przynieść określone korzyści dla środowiska naturalnego, jednakże stanowi też wyzwanie dla ich producentów, firm stosujących je w opakowaniach, konsumentów, systemu

zbiórki i przerobu odpadów, a także dla tworzących akty prawne i normy regulujące wszelkie aspekty zastosowania tego typu materiałów. Błędy lub zaniedbania w każdym ze wspomnianych obszarów mogą prowadzić do zakłócenia funkcjonowania systemu, a w konsekwencji obniżyć jego wydajność lub w skrajnym wypadku podważyć sens zastosowania materiału biodegradowalnego. Na etapach projektowania i produkcji polimeru istotne jest opracowanie i wytworzenie materiału spełniającego wymogi dotyczące podatności na procesy biodegradacji, jakości powstającego kompostu oraz jego wpływu na środowisko naturalne. Należy podkreślić, że opakowania biodegradowalne nie są panaceum na wszystkie problemy związane z zagospodarowaniem odpadów opakowaniowych, więc ich zastosowanie ma sens (ekologiczny, ekonomiczny, społeczny) tylko w nielicznych grupach opakowań i tylko w sprawnie funkcjonującym, efektywnym systemie ich wytwarzania, użytkowania i zagospodarowania poużytkowego.

Przed zastosowaniem materiału w opakowaniu konkretnego produktu (grupy produktów) konieczne jest określenie zgodności jego parametrów z wymaganiami stawianymi temu właśnie układowi opakowanie-produkt.

Konsument musi być świadomy wykorzystania w opakowaniu materiału biodegradowalnego oraz sposobów postępowania z tego typu odpadami, co wiąże się z jednej strony z czytelnym systemem znakowania opakowań, z drugiej zaś – ze świadomością konieczności odpowiedniej segregacji tego typu odpadów. Sens powyższym działaniom nadaje istnienie i sprawne funkcjonowanie systemu zbiórki i zagospodarowania segregowanych wcześniej odpadów.

Szeroki obszar problemów związanych z zastosowaniem opakowań biodegradowalnych wymaga licznych uregulowań prawnych oraz normatywnych w zakresie wielu, czasem wzajemnie bardzo odległych zagadnień.

Opracowano już wiele technologii wytwarzania materiałów zwanych biotworzywami, zarówno z surowców petrochemicznych, jak i pochodzących ze źródeł odnawialnych. Tylko nieliczne z nich znalazły dotychczas szersze zastosowanie w branży opakowaniowej.

## **1. Biologiczne przetwarzanie odpadów**

Biologiczne przetwarzanie odpadów towarzyszy człowiekowi od zarania dziejów. Pierwszą przemysłową instalację wytwarzania biogazu uruchomiono w Bombaju w 1859 r. W Europie pierwsza instalacja rozpoczęła pracę w Exeter w Anglii w 1895 r., w Polsce w Poznaniu w 1928 r. [Lusk 1998; Brodowicz 1983].

Ze względu na swoją prostotę, wydajność oraz powszechną dostępność surowca metoda biogazyfikacji zyskała ogromną popularność. Szacuje się, że na świecie pracuje obecnie od sześciu do ośmiu milionów instalacji dostarczających biogaz do celów grzewczych i oświetleniowych dla zasilających je w surowiec

gospodarstw [Lusk 1998]. Przetwarzanie biologiczne odpadów w warunkach tlenowych stosowano już w starożytnym Rzymie, gdzie odpady roślinne mieszano ze sobą i układano w pryzmy, które co pewien czas były przerzucane. Powstały w ten sposób materiał zwany *kompostem*<sup>1</sup> wykorzystywano jako nawóz w rolnictwie [http://web.extension]. Pierwsze instalacje przemysłowe przetwarzające odpady komunalne, roślinne oraz odchody uruchomiono w trzeciej dekadzie XX w. w Indiach [Haug 1993]. Przetwarzanie odpadów miejskich na kompost rozpoczęto w 1931 r. w Holandii, gdzie uruchomiona w Wijster instalacja produkowała rocznie około 85 tys. ton kompostu z odpadów pochodzących od około 770 tys. mieszkańców [Jędrzak 2008, s. 2–3]. Dynamiczny rozwój technologii kompostowania nastąpił w drugiej połowie XX w.

Zależnie od warunków prowadzenia procesu biologiczne przetwarzanie odpadów może odbywać się na drodze kompostowania w warunkach tlenowych (aerobowych) lub fermentacji metanowej w warunkach beztlenowych (anerobowych). Podstawowe cechy obu procesów zestawiono w tabeli 1.

Materiałem wyjściowym do procesu przetwarzania biologicznego może być praktycznie każdy odpad organiczny (tabela 2). Surowce o strukturze porowatej zapewniające dobre natlenienie złoża preferowane są do procesu tlenowego – kompostowania. Zwarta budowa oraz duża wilgotność (osady ściekowe, bioodpady zbierane selektywnie, trawa) nadają się lepiej do obróbki beztlenowej – fermentacji. Duża różnorodność i niejednorodność składu odpadów organicznych czyni konieczną optymalizację właściwości materiału wyjściowego poprzez mieszanie różnych frakcji odpadów oraz niezbędnych dodatków tak, by spełniały wymagania stawiane przez stosowaną metodę obróbki (tabela 3). Najistotniejsze korzyści z zastosowania biologicznego przetwarzania odpadów to:

**Tabela 1. Porównanie podstawowych parametrów kompostowania i fermentacji**

| Parametr                | Kompostowanie                               | Fermentacja                               |
|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Produkty procesu        | CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, kompost | CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , humus |
| Czas obróbki (tygodnie) | 8–16                                        | 2–3*                                      |
| Stopień rozkładu (%)    | ≈ 50                                        | 60–75                                     |
| Obciążenie odorem       | średnie–wysokie                             | małe                                      |
| Bilans energetyczny     | negatywny                                   | pozytywny**                               |
| Powierzchnia instalacji | duża                                        | mała                                      |

\* Dodatkowe uszlachetnianie kompostu do 6 tygodni.

\*\* Z uwzględnieniem odzysku biogazu.

Źródło: [Rosik-Dulewska 2008, s. 220].

<sup>1</sup> Termin „kompost” pochodzi od łacińskiego słowa *componere* – składać, kombinować.

**Tabela 2. Najważniejsze odpady podlegające przetwarzaniu metodami biologicznymi**

| Pochodzenie                             | Grupa                                 | Przykładowe składniki                                                   | Metoda |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------|
| Rolnictwo,<br>leśnictwo,<br>sadownictwo | odpady roślinne                       | słoma, owoce, warzywa, trawa                                            | K, F   |
|                                         | biomasa z upraw roślin energetycznych | kukurydza, trawa, słoma, buraki                                         | F      |
|                                         | odchody zwierzęce                     | gnojowica, obornik                                                      | F      |
| Przemysł:<br>drzewny,<br>meblowy...     |                                       | kora, trociny, wióry, papier, osady włókien papierowych lub tekstylnych | K      |
| Przemysł spożywczy                      |                                       | wytłoki, wywary, melasa, odpadki z rzeźni, zakładów drobiarskich...     | F      |
| Odpady komunalne                        | z gospodarstw domowych                | odpady kuchenne, ogrodowe, papier, tworzywa sztuczne                    | K      |
|                                         | gromadzone selektywnie                | odpady kuchenne, ogrodowe, zabrudzony papier                            | K      |
|                                         | odpady zielone                        | trawa, liście, łodygi                                                   | K      |
|                                         | z usług, gastronomii i handlu         | odpady kuchenne, resztki posiłków, zepsute produkty spożywcze, kwiaty   | K, F   |
| Osady ściekowe                          |                                       |                                                                         | F      |

K – kompostowanie, F – fermentacja.

Źródło: Na podstawie: [Dyrektywa 2008/98/WE].

- możliwość jednoczesnego przerabiania odpadów organicznych różnego pochodzenia,
- brak niebezpiecznych dla środowiska substancji chemicznych wydzielanych w trakcie procesu,
- ograniczenie ilości odpadów przeznaczonych do składowania,
- kontrola lub w przypadku fermentacji całkowita eliminacja wydzielania odorów i bioaerozoli,

**Tabela 3. Optymalne parametry materiału wyjściowego do przeróbki metodami biologicznymi**

| Parametr             | Kompostowanie | Fermentacja |
|----------------------|---------------|-------------|
| Zawartość wody (%)   | 40–60         | 60–92       |
| Wymiary cząstek (cm) | 1,5–7,5       |             |
| pH                   | 6–8           | 6,8–7,4     |
| C/N*                 | 25/1–35/1     | 10/1 5/1    |

\* C/N – stosunek zawartości (masy) węgla do azotu w przetwarzanym materiale.

- ograniczenie ilości odpadów przeznaczonych do składowania,
- kontrola lub w przypadku fermentacji eliminacja wydzielania odorów i bioaerozoli,
- eliminacja organizmów patogennych,
- frakcja odpadów przekazywana na wysypisko generuje minimalną ilość biogazów oraz odcieków o niewielkiej zawartości zanieczyszczeń,
- efekt końcowy procesu – ekologiczny, polepszający jakość gleby kompost, poprawiający rachunek ekonomiczny procesu.

W przypadku fermentacji dodatkową korzyścią jest dodatni bilans energetyczny procesu wynikający z możliwości zagospodarowania powstającego biogazu [Jędrzejak 2008, s. 2–3; Epstein 1997].

Zarówno technologia kompostowania, jak i fermentacji wykorzystuje wiele metod stosowanych w licznych odmianach zależnych od stawianych im wymagań (m.in. ilości i rodzaju przetwarzanych odpadów), poziomu technologicznego, uwarunkowań prawno-organizacyjnych oraz możliwości ekonomicznych inwestora [Haug 1993, s. 28–90].

## 2. Polimery biodegradowalne

Termin biotworzywa<sup>2</sup> obejmuje dwie grupy polimerów definiowane na podstawie dwóch różnych kryteriów: pochodzenia surowca lub zdolności do rozkładu biologicznego – biodegradacji. Biotworzywem może być więc nazwane tworzywo które:

- wytwarzane jest z surowców odnawialnych i posiada zdolność do biodegradacji,
- wytwarzane jest z surowców odnawialnych lecz bez możliwości biodegradacji,
- wytwarzane jest z surowców nieodnawialnych i podlega procesowi rozkładu biologicznego.

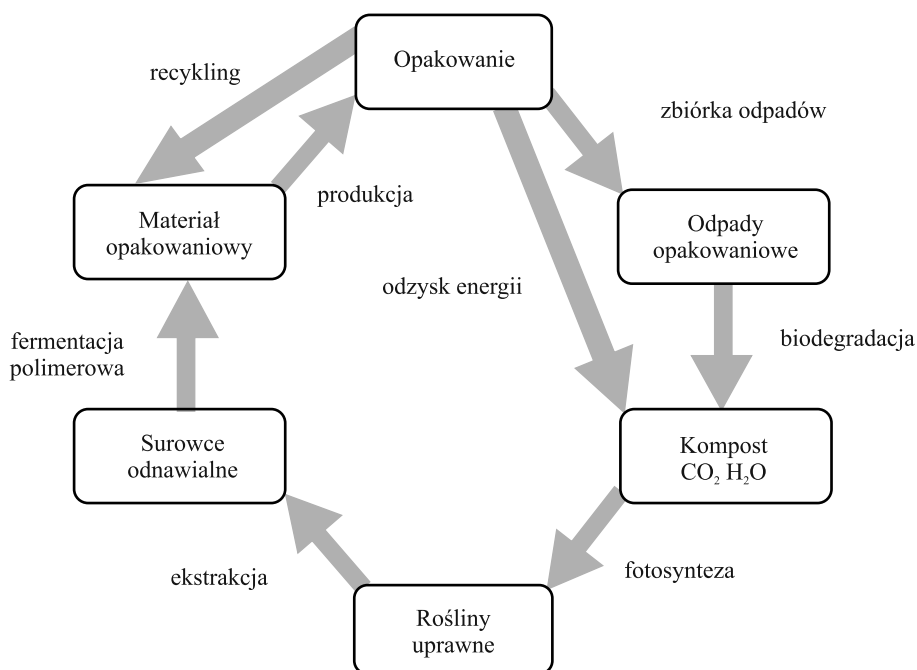
Innym często używanym terminem jest biopolimer<sup>3</sup>, który określa polimery naturalnie występujące w organizmach żywych. W przypadku wielu biotworzyw ich wytwarzanie polega na wydzieleniu z matrycy biologicznej, oczyszczeniu i ewentualnej modyfikacji biopolimeru, np. celulozy, skrobi. W wielu wypadkach biopolimer stanowi jedynie surowiec do produkcji biotworzywa, przy czym otrzymany polimer finalny ma zupełnie inną budowę chemiczną niż polimer wyjściowy, np. poli(kwas mlekowy) otrzymywany ze skrobi kukurydzianej.

Wykorzystanie surowców odnawialnych stanowi poważną zaletę biotworzyw, gdyż pozwala na racjonalizację gospodarki surowcami kopalnymi. Najistotniejszą korzyścią dla środowiska naturalnego jest jednak tworzenie zamkniętego cyklu życia materiału opakowaniowego, w którym ditlenek węgla

<sup>2</sup> Termin „biotworzywo” odpowiada angielskiemu *bioplastic*.

<sup>3</sup> Termin „biopolimer” odpowiada angielskiemu *biopolymer*.

z atmosfery w procesie fotosyntezy, wraz z wodą, przy pomocy gleby, tworzy surowiec do produkcji polimeru. Po upływie czasu pełnienia swojej funkcji materiał opakowaniowy zostaje wysegregowany i poddany obróbce biologicznej, w wyniku której ponownie wraca do atmosfery w postaci ditlenku węgla oraz do gleby jako biomasa polepszająca jej właściwości, pozwalając w ten sposób na dalszą, efektywną produkcję surowca, np. do produkcji biotworzyw (rysunek 1).



**Rysunek 1. Cykl życia biopolimerów opakowaniowych**

Źródło: Na podstawie: <http://www.european-bioplastics.org> [dostęp: 2010]

Zastosowanie tworzyw biodegradowalnych przynosi liczne korzyści:

- pozwala na oszczędność surowców nieodnawialnych,
- redukuje ilość odpadów gromadzonych na składowiskach,
- przyczynia się do redukcji emisji CO<sub>2</sub>,
- stymuluje rozwój rolnictwa – popyt na określone grupy produktów, produkcja kompostu.

### 3. Rozkład biologiczny polimerów

Mianem biodegradowalnych określane są polimery wykazujące zdolność do rozkładu pod wpływem czynników biologicznych w rozsądnym okresie czasu.

Właściwość tę posiadają praktycznie wszystkie polimery pochodzenia naturalnego, gdyż natura obdarzyła bakterie i grzyby szerokim arsenalem narzędzi – enzymów przydatnych w procesie dezintegracji cząstek polimeru na drobniejsze elementy, które na dalszym etapie procesu podlegają konsumpcji. W przypadku polimerów syntezowanych przez człowieka odporność na czynniki biologiczne stanowi istotny czynnik determinujący ich zastosowanie. Okres funkcjonowania polimerów syntetycznych w środowisku naturalnym jest, w skali ewolucji, ekstremalnie krótki, zbyt krótki, by nastąpiło przystosowanie się mikroorganizmów do wykorzystywania ich jako pokarmu [Mueller 2006]. Chociaż możliwe jest dziś stworzenie metodami inżynierii genetycznej mikroorganizmów rozkładających określoną grupę polimerów, to wprowadzenie ich do środowiska niesłoby za sobą trudne do przewidzenia skutki, które w dłuższym okresie mogłyby być katastrofalne.

Ze względu na złożoność procesów zachodzących w trakcie rozkładu biologicznego polimerów oraz wiele zależności ekonomiczno-społeczno-politycznych funkcjonuje wiele bardzo różnych definicji biodegradacji. Czynniki powodujące różnorodność definicji pojęć: degradacji, biodegradacji oraz biodegradowalności można podzielić na cztery grupy:

- zróżnicowania warunków środowiskowych, w jakich proces może zachodzić, oraz wzajemnej interakcji: proces biodegradacji-środowisko,
- różnic w podejściu badaczy do zjawiska: metody badawcze, zakres oraz kryteria definiowania procesu,
- politycznych, ekonomicznych, społecznych i środowiskowych skutków wynikających z przyjęcia określonego rozwiązania,
- różnic językowych.

W większości stosowane definicje skupiają się na wyrażeniu potencjału materiału do podlegania procesom biodegradacji, w mniejszym stopniu odnoszą się do czasu trwania procesu i uzyskiwanego stopnia degradacji tworzywa [Bastioli 2005].

Pojęcie degradacji polimeru obejmuje procesy mające miejsce w materiale pod wpływem działania czynników środowiskowych: fizycznych (np. światło, temperatura, siły mechaniczne), chemicznych oraz biologicznych. Rezultatem zachodzących procesów są zmiany parametrów fizycznych (mechanicznych, optycznych, elektrycznych), chemicznych (rozerwanie wiązań, tworzenie nowych grup funkcyjnych itp.) oraz użytkowych polimeru (erozja powierzchni, odbarwienie, rozwarstwienie itp.). Degradacja polimeru może zachodzić pod wpływem różnych czynników. Do najważniejszych zaliczamy promieniowanie elektromagnetyczne, temperaturę, tlen oraz działanie mikroorganizmów (tabela 4).

Biodegradacja polimeru jest procesem bardzo złożonym, na co wpływa wiele czynników. Z jednej strony są to właściwości polimeru: skład chemiczny, rodzaj

**Tabela 4. Charakterystyka metod degradacji polimerów**

| Parametr                    | Fotodegradacja                 | Termo-<br>oksydegradacja | Biodegradacja  |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------|
| Czynnik aktywny             | prom.elektromagnet.<br>UV, VIS | ciepło, tlen             | mikroorganizmy |
| Temperatura inicjacji       | otoczenia                      | podwyższona              | otoczenia      |
| Szybkość                    | szybka (inicjacja wolna)       | szybka                   | wolna          |
| Oddziaływanie na środowisko | przyjazna                      | nieakceptowalna          | przyjazna      |
| Stopień akceptacji          | akceptowalna                   | nieakceptowalna          | preferowana    |
| Koszty                      | droga                          | –                        | tania          |

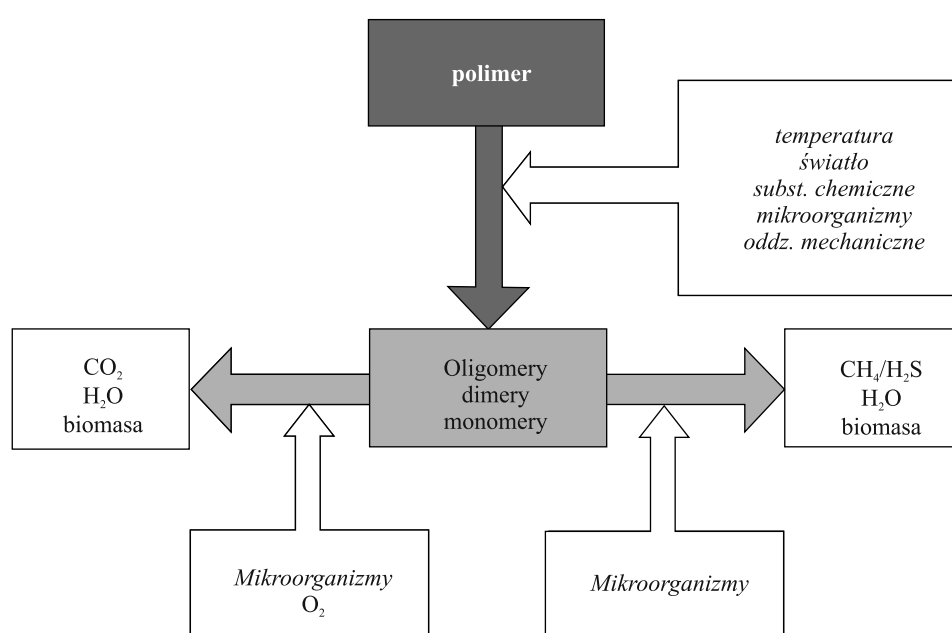
Źródło: Na podstawie: [Shah i in. 2008].

grup funkcyjnych, masa cząsteczkowa, struktura wewnętrzna, zawartość dodatków, zanieczyszczeń itp. [Artham i Doble 2008]. Z drugiej jest to środowisko, w którym znajdują się materiały polimerowe, w szczególności zużyte opakowania, które charakteryzować się może szerokim spektrum właściwości. Zarówno parametry fizyczne (temperatura, naświetlenie, wilgotność, oddziaływania mechaniczne), jak i chemiczne (pH, dostęp tlenu, obecność innych związków itp.) mogą kształtować się w bardzo szerokim zakresie wartości. W warunkach rzeczywistych proces przebiega w środowisku, w którym występuje przeogromna różnorodność mikroorganizmów, której odtworzenie w warunkach laboratoryjnych nie jest możliwe.

Zwłaszcza w przypadku odpadów opakowaniowych już z chwilą umieszczenia w pojemniku (worku) na odpady dochodzi do kontaktu z bardzo różnorodnymi mikrobami. Dalsza droga na wysypisko to kolejne możliwości skolonizowania materiału przez kolejne gatunki. Stwierdzenie, że nie ma na świecie dwóch pojemników na odpadki, w których panowałyby identyczne warunki fizykochemiczne, wydaje się nie budzić wątpliwości. Dlatego też celowe jest ograniczenie opisu procesu biodegradacji tworzywa do podziału na poszczególne etapy z podaniem ogólnych warunków oraz najważniejszych czynników wpływających na ich przebieg. Należy jednakże pamiętać, że biodegradacja jest zjawiskiem będącym sumą procesów degradacji polimeru pod wpływem wszystkich działających w danej chwili czynników. Dlatego też terminy biodegradacja i biodegradowalność nie mają charakteru absolutnego atrybutu danego materiału, lecz są ściśle powiązane z konkretnymi warunkami panującymi w środowisku, w którym proces ma zachodzić [Krzan i in. 2006]. Pomimo definiowania biodegradacji jako procesu przebiegającego pod wpływem czynników biologicznych należy też pamiętać, że proces ten nigdy nie przebiega autonomicznie. Zwykle działanie mikroorganizmów przebiega równoległe z degradacją



polimeru pod wpływem czynników abiotycznych ułatwiających, a często wręcz umożliwiających (inicjujących) ich działanie. W swojej naturalnej postaci polimery nie mogą przenikać przez błony komórkowe mikroorganizmów. Aby mogły być wykorzystane jako źródło pożywienia, muszą ulec rozpadowi – depolimeryzacji do mono- bądź oligomerów [Lucas 2008; Ojeda i in. 2009]. Depolimeryzacja może zachodzić pod wpływem wielu, niekoniecznie biologicznych czynników, których intensywność w istotny sposób determinuje przebieg całego procesu biodegradacji (rysunek 2).



**Rysunek 2. Przebieg procesu biodegradacji polimerów**

Działanie sił mechanicznych powodujących rozciąganie, ściskanie, tarcie, rozrywanie itp. poszczególnych elementów odpadu skutkuje uszkodzeniami struktury polimeru zarówno w skali makro, jak i mikro. W miejscach uszkodzeń mechanicznych możliwy jest łatwiejszy dostęp innych czynników – substancje chemiczne, mikroorganizmy – powodujących dalszą dekompozycję materiału. Choć uszkodzenia mechaniczne nie stanowią głównego czynnika wywołującego degradację polimeru, mogą zainicjować bądź w istotny sposób przyspieszyć omawiany proces [Briassoulis 2005; Scarascia-Mugnozza i in. 2006].

Zdecydowana większość tworzyw sztucznych posiada zdolność absorpcji promieniowania elektromagnetycznego z zakresu od ultrafioletu, poprzez promieniowanie widzialne po podczerwień. Promieniowanie UV może powodować bezpośrednią fotolizę bądź inicjować procesy fotooksydacyjne. Zakres widzial-

ny promieniowania oraz podczerwień powodują podwyższenie temperatury materiału, sprzyjając procesom degradacji termicznej oraz procesom utleniania [Shah i in. 2008].

Mając istotny wpływ na dynamikę procesów chemicznych i biologicznych, temperatura w decydujący sposób wpływa na szybkość procesu biodegradacji. Ponadto w przypadku materiałów o względnie niskiej temperaturze topnienia, która może być zbliżona do temperatur osiągniętych w trakcie procesu kompostowania, np. poli(kaprolakton  $\approx 60^\circ\text{C}$ , MaterBi  $\approx 64^\circ\text{C}$ ), zmiany zachodzące w strukturze polimeru znacznie ułatwiają procesy depolimeryzacji. W trakcie procesu kompostowania, na początku fazy intensywnego rozkładu, temperatura rozkładanego materiału może sięgać  $70^\circ\text{C}$  [Jędrzak 2008, s. 199]. W temperaturach zbliżonych do temperatury zeszklenia następują zmiany proporcji struktur krystalicznych i amorficznych na korzyść tych drugich, bardziej podatnych na przebieg procesów degradacji chemicznej oraz biologicznej [Iovino i in. 2008].

Spośród zjawisk chemicznych w procesie depolimeryzacji decydującą rolę odgrywają procesy utleniania, reakcje wolnorodnikowe oraz hydroliza. Degradacji oksydacyjnej sprzyja obecność rozgałęzionych łańcuchów polimeru oraz wiązań nienasyconych [Wiles i Scott 2006]. Z kolei procesowi hydrolizy, oprócz obecności wody, sprzyja obecność podatnych na hydrolizę wiązań kowalencyjnych znajdujących się m.in. w grupach estrowych, eterowych i karbamidowych. Na dynamikę procesu wpływają także: temperatura, pH, czas oddziaływania oraz obecność czynników katalizujących reakcję (kwasy, zasady, kationy itd.), które znajdują się w niemal każdym środowisku, w którym przebiegają procesy degradacji polimerów opakowaniowych [Bastioli 2005].

Drugim etapem procesu biodegradacji jest mineralizacja, czyli zachodzące we wnętrzu komórki procesy przemiany materii mające na celu: podtrzymanie procesów życiowych, pozyskanie materiału budulcowego oraz przeprowadzenie procesów reprodukcji, których finalnymi produktami są: woda, biomasa,  $\text{CO}_2$  lub  $\text{CH}_4$ . Zależnie od warunków funkcjonowania danych mikroorganizmów istnieją trzy zasadnicze drogi katalitycznego wytwarzania przez komórki energii: oddychanie tlenowe, oddychanie beztlenowe i fermentacja. W procesach biodegradacji polimerów biorą udział zarówno działające wewnątrz komórki endoenzymy, jak i wydzielane do jej otoczenia egzoenzymy. Pierwsze odpowiadają za przebieg procesów biochemicznych w komórce. Drugie prowadzą rozkład makromolekuł polimeru do mniejszych cząstek (oligo-, di-, monomerów) zdolnych do przenikania przez błony komórkowe [Gu 2003]. Podobnie jak w przypadku czynników abiotycznych większą podatność na depolimeryzację przejawiają struktury amorficzne umożliwiające enzymom łatwiejszy dostęp do wiązań chemicznych podlegających ich działaniu. Generalnie spełniona jest zasada, że (bio)degradacja polimeru jest tym łatwiejsza, im bardziej jego budowa zbliżona jest do struktury polimeru naturalnego, np.: celulozy, chityny, glikogenu. Efek-

tywny przebieg procesu biodegradacji możliwy jest tylko przy synergicznym działaniu czynników fizykochemicznych i biologicznych. Dlatego też mówiąc o biodegradacji, należy mieć na uwadze złożoność procesów na nią się składających oraz fakt, że część z nich, a przez to i sama biodegradacja, nie jest procesem strictly biologicznym.

Uwalniane do środowiska końcowe produkty procesów będące prostymi związkami nieorganicznymi nie wykazują ekotoksyczności, gdyż stanowią element naturalnego cyklu życia na ziemi. Potencjalne ryzyko w tym zakresie, w określonych warunkach, stanowić mogą niektóre związki organiczne zawarte w komórkach organizmów lub uwalniane przez nie do środowiska [Lucas i in. 2008]. Pamiętać należy też, że w praktyce proces biodegradacji nigdy nie przebiega do końca.

#### **4. Regulacje prawne dotyczące materiałów biodegradowalnych**

Patrząc na regulacje prawne: normy, procedury badawcze odnoszące się do procesu biodegradacji, w tym także te związane z produkcją, legalizacją oraz użytkowaniem opakowań z polimerów biodegradowalnych, nie sposób oprzeć się wrażeniu, że wszystkie zagadnienia ujęte zostały bardzo szczegółowo. Owa „drobiazgowość” jest pochodną wielkiej złożoności procesów biodegradacji, na którą wpływa przede wszystkim różnorodność substancji i materiałów poddawanych procesowi oraz warunków, w jakich on zachodzi. Bez ścisłego zdefiniowania i monitoringu warunków badań wzajemne porównanie otrzymanych wyników byłoby utrudnione, a w wielu wypadkach wręcz niemożliwe.

Potwierdzenie bądź zanegowanie deklarowanej zdolności do biodegradacji opakowania wymaga wielgu skomplikowanych długotrwałych i kosztownych badań. Złożony i rozległy w czasie charakter procesu biodegradacji sprawia, że podatność badanego materiału na ten proces nie może być łatwo sprawdzona przez konsumenta, producenta opakowania lub gotowego wyrobu. Tylko jasne i jednoznaczne procedury badawcze powiązane z przyznawaniem certyfikatów przez uznane, akredytowane jednostki badawcze może zapewnić zachowanie odpowiednio wysokich standardów [Bastioli 2005]. Pozytywne przejście przez procedury badawcze skutkuje uzyskaniem przez badany materiał lub produkt certyfikatu potwierdzającego spełnianie kryteriów zawartych w odnośnej normie. Zwykle uzyskanie certyfikatu połączone jest z uzyskaniem prawa do znakowania produktów odpowiednim znakiem graficznym określającym cechy materiału np. przydatność do kompostowania [Krzan i in. 2006].

Obecny stan uregulowań prawnych dotyczących opakowań w państwach Unii Europejskiej wywodzi się z Dyrektywy 94/62/EC [European Parliament] (wraz z nowelą 2004/12/EC [Directive 2004/12/EC]) „Opakowania i odpady

opakowaniowe”, w której określone zostały podstawowe wymagania odnośnie do opakowań w zakresie:

- produkcji i składu surowcowego,
- przydatności do wielokrotnego użytku,
- przydatności do recyklingu.

Dyrektywa 94/62/EC jest jedną z Dyrektyw „nowego podejścia” dążących do pełnej harmonizacji wymagań związanych z możliwie szeroko pojętym bezpieczeństwem użytkowania wyrobów. Konkretyzacji wymagań stawianych materiałom degradowanym dokonała norma [PN-EN 13432], która decyzją Komisji Europejskiej [Commission Decision] została uznana za zharmonizowaną z Dyrektywą 94/62/EC. Przy pomocy wspomnianej normy wprowadzono w życie jednolite procedury oraz kryteria oceny przydatności opakowań do kompostowania lub obróbki beztlenowej.

Normy: [PN-EN ISO 14851: 2007; PN-EN ISO 14852:2007] objęły swoim zakresem zagadnienia związane z biodegradacją w warunkach tlenowych materiałów polimerowych w środowisku wodnym. Podstawową różnicą pomiędzy powyższymi normami jest oznaczany parametr, dzięki któremu określana jest zdolność badanego materiału do rozkładu biologicznego. W normie EN ISO 14851 jest to respirometryczny pomiar zapotrzebowania tlenu, norma EN ISO 14852 oparta jest zaś na oznaczaniu ilości wydzielonego ditlenku węgla. Wraz z upowszechnianiem się polimerów biodegradowalnych wyraźnie zaczęto dostrzegać potrzebę lepszego odwzorowania procesów przebiegających w naturalnych warunkach niż testy w środowisku wodnym w warunkach aerobowych. Dopiero wprowadzenie normy [PN-EN ISO 14855:2007] rozwiązało problem, dając skuteczne narzędzie pomiarowe. Dodatkowo zastąpienie w przestrzeni reaktora kompostu poprzez matrycę z neutralnego chemicznie materiału mineralnego – Vermiculitu pozwoliło na zachowanie w trakcie badania warunków zbliżonych do panujących w realnym kompoście i jednocześnie usunięcie źródła pierwotnego węgla organicznego z układu pomiarowego [Bellia 1999].

Zadawalające wyniki testów biodegradacji danego materiału nie są jednoznaczne z uznaniem materiału za zdolny do kompostowania – kompostowalny. Mianem kompostowalnego określany jest bowiem materiał, który w ściśle zdefiniowanych warunkach, np. kompostowni przemysłowej lub kompostownika przydomowego, podlega przemianom dającym produkt finalny w postaci kompostu spełniającego wymagania stawiane tego typu produktom. Termin biodegradowalny posiada znacznie szersze znaczenie, gdyż obejmuje materiały podlegające degradacji z użyciem czynników biologicznych bez jednoznacznego wskazania ram czasowych oraz warunków przebiegu procesu.

Wysokie wymagania stawiane produktowi finalnemu – kompostowi determinują poziom wymagań stawianych przed „surowcem” dostarczanym do kompostowni. Narzędziem ewaluacji zdolności do kompostowania jest norma

EN ISO 13432 przedstawiająca schemat działań oraz zestawienie i sposób stosowania testów niezbędnych do przeprowadzenia oceny. Zawarto w niej także kryteria niezbędne do uznania opakowania za nadające się do kompostowania. Procedura oceny zdolności materiału opakowaniowego do kompostowania składa się z czterech zasadniczych części:

1. Ogólna charakterystyka materiału – zestawienie poszczególnych składników, zawartość materii organicznej oraz wybranych metali ciężkich.
2. Biodegradacja oznaczona zgodnie z normą EN ISO 14855 (ewentualnie EN ISO 14851 lub EN ISO 14852). Wymagany poziom degradacji będący sumą mineralizacji i produkcji biomasy w okresie nie dłuższym niż sześć miesięcy wynosi 90%.
3. Dezintegracja – po 12 tygodniach przebywania w kompoście w warunkach pełnoskalowych lub pilotażowych [EN ISO 16929] masa pozostałości materiału po sortowaniu na sicie o oczku 2 mm powinna być mniejsza niż 10% początkowej masy materiału.
4. Jakość kompostu – analizie podlegają podstawowe parametry fizykochemiczne: gęstość, zawartość suchej masy, substancji lotnych, pH, zawartość substancji mineralnych, azotu całkowitego, azotu amonowego, fosforu, magnezu i potasu oraz wyniki badań ekotoksyczności uzyskanego kompostu.

Już na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia uruchomione zostały pierwsze systemy badania i certyfikowania materiałów pod kątem ich biodegradowalności np. DIN– CERTCO, OK Compost, Biodegradable Products Institute. Działalność systemu jako niezależnej organizacji zewnętrznej stanowi gwarancję rzetelności zarówno badań prowadzonych zgodnie z normami, jak i wydawanych na ich podstawie certyfikatów.

W Unii Europejskiej największe znaczenie ma certyfikacja wyrobów, w tym opakowań, prowadzona w Niemczech przez DIN CERTCO [www.dincertco], członka Niemieckiej Organizacji Standaryzacji DIN. Niemiecki system certyfikacji został przyjęty w innych państwach europejskich: Szwajcarii, Holandii, Wielkiej Brytanii i Polsce. Uzyskany w tych krajach certyfikat upoważnia do oznaczania znakiem przydatności do kompostowania. W Polsce uprawnienia DIN CERTCO do prowadzenia certyfikacji wyrobów przydatnych do kompostowania uzyskało akredytowane przez PCA Centrum Certyfikacji Opakowań Centralnego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Opakowań w Warszawie.

## 5. Zagospodarowanie odpadów biodegradowalnych

Paradoks zastosowania materiałów biodegradowalnych w opakownictwie polega na diametralnej różnicy pomiędzy wymaganiami stawianymi materiałowi, który stanowi opakowanie lub jego część, a czasem gdy staje się odpadem opa-

kowaniowym. Pierwotny wymóg efektywnej ochrony opakowanego towaru sprawia, że praktyczne zastosowanie znajdują materiały o względnie dużej trwałości w warunkach użytkowania, czego następstwem jest także względnie duża trwałość materiału w warunkach „poużytkowych”. Z tego też względu szerokie zastosowanie biotworzyw ograniczone jest do aplikacji niewymagających zbyt „wygórowanych” parametrów opakowania. Wymagana podatność materiałów biodegradowalnych na czynniki fizykochemiczne i biologiczne decydujące o zaliczeniu do grupy opakowań biodegradowalnych (kompostowalnych) stawia wiele ograniczeń w zakresie zarówno pakowanych produktów, jak i środowiska, w którym po opakowaniu mogą przebywać. Troska o jakość uzyskiwanego kompostu radykalnie ogranicza możliwości dodatku powszechnie stosowanych w „klasycznych” polimerach opakowaniowych substancji polepszających właściwości, np.: barwników, przeciwutleniaczy, stabilizatorów. Postrzegana za jednego z największych producentów odpadów branża opakowaniowa wciąż poszukuje rozwiązań łączących wymagania doskonałej ochrony opakowanego produktu z koniecznością ochrony środowiska naturalnego. W ramach biodegradowalnych materiałów opakowaniowych poprawa właściwości ochronnych materiału powoduje wzrost trudności z zagospodarowaniem materiału, które muszą być zniwelowane przez wymierne korzyści wynikające z zastosowania materiału o takich wysokich właściwościach ochronnych. Doskonałą ilustracją tego typu problemów jest wdrożenie do przemysłowego zastosowania poli(kwasu mlekowego) – PLA (*poly(lacticacid)*). Podjęta z końcem XX wieku produkcja PLA na skalę przemysłową przyniosła wiele poważnych wyzwań dla wszystkich sektorów gospodarki związanych z cyklem życia polilaktydu. Z całą mocą objawiły się także wątpliwości co do rzeczywistego wpływu polimeru na środowisko naturalne. Pojawiające się problemy po części nie zostały zdiagnozowane na etapie prac laboratoryjnych i wdrożeniowych, po części zostały zaś zbagatelizowane lub przemilczane. Inne objawiły się z całą swą mocą dopiero po osiągnięciu przez nowy materiał znaczącego udziału w rynku materiałów opakowaniowych. Zakrojone na szeroką skalę działania zapobiegawcze pozwoliły na złagodzenie skutków powstałych zagrożeń. Okazało się jednak, że PLA, tak jak każda nowa technologia, oprócz niewątpliwych zalet ma także wady, których minimalizacja wymaga wielu wysiłków oraz nakładów zarówno na poziomie badań laboratoryjnych, jak i produkcji, dystrybucji oraz zagospodarowaniu materiału po użyciu. Dzięki swoim właściwościom polilaktyd znalazł szerokie zastosowanie w produkcji butelek jednorazowego użytku do napojów, w szczególności wody mineralnej. Okazuje się jednak, że pomimo iż wdrożone butelki spełniają formalne kryteria biodegradowalności i kompostowalności, ich rozpowszechnienie, oprócz niewątpliwych korzyści, przyniosło wiele nowych problemów.

Ze względu na swoje właściwości butelki z PLA trudno ulegają procesowi degradacji w środowisku naturalnym oraz na składowiskach odpadów, gdzie

wykazują trwałość niewiele mniejszą od wykonanych z „klasycznych” polimerów, np. z polietylenu. Więcej, degradacja w warunkach kompostowni otwartych, czy to przydomowych, czy komunalnych, zachodzi bardzo powoli. Jedyną wydajną formą kompostowania odpadów z PLA są zamknięte instalacje przemysłowe, w których proces degradacji prowadzony jest w kontrolowanych warunkach (około: 65°C, 63% wilgotności, pH 8,5 oraz określonym dostępie tlenu) w rozsądnym czasie – poniżej 90 dni [Kalea i in. 2007]. Niestety, tego typu instalacji jest wciąż niewiele, więc i strumień odpadów komunalnych przez nie przetwarzanych jest znikomy. Dla przykładu w Stanach Zjednoczonych w 2005 r. funkcjonowało 113 instalacji tego typu, przy czym przeróbkę odpadów komunalnych prowadzono tylko w około ¼ z nich [Royte 2006].

Niemniejsze problemy wynikają ze wzrostu udziału PLA w masie odpadów przerabianych w kompostowniach przemysłowych. W trakcie procesu następuje rozkład polimeru z wydzieleniem znacznej ilości kwasu mlekowego, który może istotnie obniżyć pH w masie kompostu, zaburzając przebieg procesu kompostowania. Ponadto rozkład wydzielonego w trakcie procesu kwasu mlekowego wymaga dostarczenia znacznie większych ilości tlenu, z czym istniejące instalacje nie zawsze sobie radzą, gdyż projektowane były według innych założeń. Wydaje się, że rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie kompostowania w warunkach anaerobowych. Dodatkowym efektem tej technologii jest poprawa bilansu energetycznego cyklu życia biotworzywa poprzez uzyskanie metanu wykorzystywanego dalej w celach energetycznych zamiast ditlenku węgla i wody otrzymywanych w warunkach aerobowych.

Podobieństwo do butelek „PET” oraz niewielka świadomość (dbałość o ten aspekt ochrony środowiska) konsumentów sprawiają, że duża część butelek trafia do ponownej przeróbki wraz z butelkami niedegradowalnymi. Efektem jest znaczące pogorszenie jakości regranulatu bądź konieczność kosztownej segregacji wtórnej. Wysegregowane odpady PLA w stanie jednorodnym nie nadają się do obróbki biologicznej, muszą więc być mieszane z innymi frakcjami odpadów komunalnych, co generuje kolejne koszty. Z kolei transport do zakładu przetwórczego i ponowna przeróbka na granulaty PLA nie ma uzasadnienia ani ekonomicznego, ani ekologicznego [Gander i Raine 2007]. Powyższe problemy w znacznie mniejszym stopniu dotyczą materiałów biodegradowalnych o mniejszej odporności na czynniki biologiczne, np. polimerów na bazie skrobi.

Także w sferze zachowań społecznych pojawia się poważny problem. Wielu konsumentów przekonanych o łatwej biodegradowalności materiałów oznaczonych odpowiednim znaczkiem wrzuca je do przydomowych kompostowników lub nawet po prostu wyrzuca, ponieważ sądzi, że w środowisku naturalnym ulegną one szybkiej i nieszkodliwej degradacji. Dowodem na takie „uświadamianie” konsumentów są torby foliowe (tzw. reklamówki) rozprowadzane w polskich sklepach jako oksybiodegradowalne.

Z drugiej strony brak spójnego programu zagospodarowania odpadów z biotworzyw połączony z brakiem należytej edukacji społeczeństwa oraz niejednoznacznym systemem oznaczania opakowań przeznaczonych do kompostowania doprowadzić może do zniechęcenia społeczeństwa do segregacji tychże materiałów, a w konsekwencji zrujnować pozytywny obraz biotworzyw w społeczeństwie [Korner i in. 2005].

Patrząc na sprawę polimerów biodegradowalnych, nie sposób pominąć konsekwencji ekologicznych, ekonomicznych, społecznych i politycznych znacznego wzrostu areалу upraw roślin przeznaczonych na surowiec do produkcji biotworzyw i, w znacznie większym stopniu, biopaliw. Pomimo oszczędności surowców kopalnych wielkoskalowa uprawa roślin przemysłowych wiąże się z wprowadzeniem na olbrzymich obszarach upraw monokulturowych niszczących różnorodność biologiczną, krajobraz, gospodarkę wodną itp. Działalność przedsiębiorstw komercyjnych, jakimi są firmy zajmujące się produkcją biopolimerów, musi być efektywna ekonomicznie, co nie jest możliwe bez zastosowania intensywnego nawożenia, stosowania środków ochrony roślin oraz roślin modyfikowanych genetycznie. Ponadto efektywność ekonomiczna wymaga prowadzenia upraw na glebach odpowiedniej jakości, o energochłonności uprawy, transportu surowca i jego przeróbki nie wspominając. Wzrost produkcji biotworzyw i biopaliw generuje zapotrzebowanie na nowe arealy, co paradoksalnie skutkować może dalszym karczowaniem lasów tropikalnych pod uprawy rolne. Nie pozostaje też bez wpływu na ceny pozostałych płodów rolnych a przez to i żywności. Te z kolei przekłada się bezpośrednio na sytuację społeczno-ekonomiczną społeczeństw, co w przypadku tych najbiedniejszych prowadzić może do poważnych niepokojów społecznych. Zależność ta znalazła potwierdzenie w postaci występujących od drugiej połowy 2010 roku protestów, zamieszek i działań zbrojnych w krajach Afryki Północnej i Bliskiego Wschodu, których przyszłe konsekwencje trudne są dziś do przewidzenia. Działania państw wysoko rozwiniętych na rzecz wzrostu udziału surowców odnawialnych w rynku paliw oraz tworzyw sztucznych opierają się na założeniu, że panujący obecnie układ społeczno-ekonomiczny jest trwały. Założeniu wygodnym dla ceniących spokój i dobrobyt społeczeństw Zachodu oraz licznych przedsiębiorstw i organizacji czerpiących profity z działalności na rzecz środowiska naturalnego. Dla całego środowiska naturalnego, w skład którego wchodzi także nasza cywilizacja, korzyści takiej polityki nie są już tak jednoznaczne.

## **Zakończenie**

Nie ulega wątpliwości, że ze względu na swoją masę, różnorodność i właściwości odpady opakowaniowe stanowią jedno z poważniejszych zagrożeń dla śro-



dowiska naturalnego. Zastosowanie biodegradowalnych materiałów opakowaniowych stanowi jedną z możliwości zastąpienia „klasycznych” polimerów opakowaniowych mogącą przynieść pozytywne efekty dla ochrony środowiska naturalnego. Jednakże implementacja nowych, innowacyjnych rozwiązań w skomplikowany układ zależności, w jakim funkcjonuje współczesne opakowanie, jest zadaniem wymagającym wielopłaszczyznowej współpracy wszystkich podmiotów zainteresowanych problemem, której podstawą powinna być świadomość, że stanowi ona rozwiązanie cząstkowe, efektywne w wąskim zakresie aplikacji.

## Bibliografia

- Artham, T., Doble, M., 2008, *Biodegradation of Aliphatic and Aromatic Polycarbonates*, *Macromolecular Bioscience*, no. 8 (1), s. 14–24.
- Bastioli, C., 2005, *Handbook of Biodegradable Polymers*, iSmithers Rapra.
- Bellia, G., Tosin, M., Floridi, G. i in., 1999, *Activated Vermiculite, a Solid Bed for Testing Biodegradability under Composting Conditions*, *Polymer Degradation and Stability*, no. 66, s. 65–79.
- Briassoulis, D., 2005, *The Effects of Tensile Stress and the Agrochemical Vapam on the Ageing of Low Density Polyethylene (LDPE) Agricultural Films, Part I. Mechanical behaviour*, *Polymer Degradation and Stability*, no. 88, s. 489–503.
- Brodowicz, K., 1983, *Biogaz, znaczenie gospodarcze, wytwarzanie*, Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, s. 1–33.
- Commission Decision of 28 June 2001 relating to the publication of references for standards EN 13428:2000, EN 13429:2000, EN 13430:2000, EN 13431:2000 and EN 13432:2000 in the Official Journal of the European Communities in connection with Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste.
- Directive 2004/12/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, Dz.Urz. UE L 312/3.
- EN ISO 16929 Determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test.
- Epstein, E., 1997, *The Science of Composting*, CRC Press.
- European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste.
- Gander, P., Raine, T., 2007, *The PLA Puzzle*, *Packaging News*, no. 6, <http://www.co.uk/materials/the-pla-puzzle/> [dostęp: kwiecień 2011].
- Gu, J.D., 2003, *Microbiological Deterioration and Degradation of Synthetic Polymeric Materials: Recent Research Advances*, *International Biodeterioration & Biodegradation*, no. 52, s. 69–91.
- Haug, R.T., 1993, *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers.

- <http://web.extension.illinois.edu/homecompost/history.html> [dostęp: październik 2010].
- Iovino, R., Zullo, R., Rao, M.A., i in., 2008, *Biodegradation of Poly(lactic acid)/starch/coir Biocomposites under Controlled Composting Conditions*, *Polymer Degradation and Stability*, no. 93, s. 147–157.
- Jędrzeza, A., 2008, *Biologiczne przetwarzanie odpadów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kalea, G., Aurasa, R., Singha, S.P., Narayanb, R., 2007, *Biodegradability of Polylactide Bottles in Real and Simulated Composting Conditions*, *Polymer Testing*, vol. 26, s. 1049–1061.
- Korner, I., Redemann, K., Stegmann, R., 2005, *Behaviour of Biodegradable Plastics in Composting Facilities*, *Waste Management*, no. 25, s. 409–415.
- Krzan, A., Hemjinda, S., Miertus, S., i in., 2006, *Standardization and Certification in the Area of Environmentally Degradable Plastics*, *Polymer Degradation and Stability*, no. 91, s. 2819–2833.
- Lucas, N., Bienaime, Ch., Belloy, Ch., i in., 2008, *Polymer Biodegradation: Mechanisms and Estimation Techniques*, *Chemosphere*, no. 73, s. 429–442.
- Lusk, P., 1998, *Methane Recovery from Animal Manures. The Current Opportunities Casebook*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, USA.
- Mueller, R.J., 2006, *Biological Degradation of Synthetic Polyesters – Enzymes as Potential Catalysts for Polyester Recycling*, *Process Biochemistry*, no. 41, s. 2121–2128.
- Ojeda, T.F., Dalmolin, E., Forte, M.M., i in., 2009, *Abiotic and Biotic Degradation of Oxo-biodegradable Polyethylene*, *Polymer Degradation and Stability*, no. 94, s. 965–970.
- PN-EN 13432 Opakowania – Wymagania dotyczące opakowań przydatnych do odzysku przez kompostowanie i biodegradację – Program badań i kryteria oceny do ostatecznej akceptacji opakowań.
- PN-EN ISO 14851:2007 Oznaczanie całkowitej biodegradacji tlenowej materiałów polimerowych w środowisku wodnym. Metoda pomiaru zapotrzebowania tlenu w zamkniętym respirometrze.
- PN-EN ISO 14852:2007 Oznaczanie całkowitej biodegradacji tlenowej materiałów polimerowych w środowisku wodnym. Metoda oznaczania wydzielonego ditlenku węgla.
- PN-EN ISO 14855-1:2007 Oznaczanie całkowitej biodegradacji tlenowej tworzyw sztucznych w kontrolowanych warunkach kompostowania. Metoda pomiaru wydzielonego ditlenku węgla. Część 1: Metoda ogólna.
- Rosik-Dulewska, 2008, *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Royte, E., 2006, *Wal-Mart and Others are Going Green with „Biodegradable” Packaging Made from Corn. But Is This Really the Answer to America’s Throwaway Culture?*, *Smithsonian Magazine*, August.
- Royte, E., 2006a, *Corn Plastic to the Rescue*, *Smithsonian Magazine*, August, <http://www.smithsonianmag.com/science-nature/plastic.html> [dostęp: kwiecień 2011].
- Scarascia-Mugnozza, G., Schettini, E., Vox, G., i in., 2006, *Mechanical Properties Decay and Morphological Behaviour of Biodegradable Films for Agricultural*

- Mulching in Real Scale Experiment*, Polymer Degradation and Stability, no. 91, s. 2801–2808.
- Shah, A.A., Hasan, F., Hameed, A., i in., 2008, *Biological Degradation of Plastics: a Comprehensive Rreview*, Biotechnology Advances, no. 26, s. 246–265.
- Siracusaa, V., Rocculib, P., Romanib, S., Rosa, M.D., 2008, *Biodegradable Polymers for Food Packaging: a Review*, Trends in Food Science & Technology, no. 19, s. 634–643.
- Wiles, D.M., Scott, G., 2006, *Polyolefins with Controlled Environmental Degradability*, Polymer Degradation and Stability, no. 91, s. 1581–1592.
- www.dincertco.de [dostęp: październik 2010].

### **BIODEGRADABLE PACKAGING AS A POTENTIAL SOLUTION OF PACKAGING WASTE PROBLEM**

**Summary:** The article presents a wide range of problems associated with biodegradable packaging, emphasizing: definition of biomaterials, requirements for packaging materials, biodegradation process, problems with biodegradable plastic waste management, and social, economic and economical consequences of a wide application of biodegradable packaging. Biopolymers are an attractive alternative to petrochemical polymers, however, any application needs an in-depth analysis of the benefits and drawbacks. The complexity of a cross-system shows that there is no one best method to resolve packaging waste problem.