

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**  
**Ústav pro životní prostředí**

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



Biodegradabilní plasty v systému nakládání s odpady  
Biodegradable plastics in the waste management system

Bakalářská práce

**Pavel Šalanda**

Vedoucí práce: RNDr. Petra Innemanová, Ph.D.

Praha, květen 2017

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu. Tištěná verze práce je shodná s elektronickou verzí vloženou v SIS.

V Praze, 16. 5. 2017

Podpis

## Poděkování

Děkuji své školitelce RNDr. Petře Innemanové, Ph.D za vstřícný přístup a odborný dohled při psaní práce. Rovněž děkuji své rodině za podporu po celou dobu studia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Abstrakt</b> .....	5
<b>2</b>	<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	7
<b>3</b>	<b>Úvod</b> .....	8
<b>4</b>	<b>Bioplasty – členění</b> .....	9
<b>5</b>	<b>Proč používat bioplasty?</b> .....	11
5.1	Úspora fosilních zdrojů .....	11
5.2	Nízké emise skleníkových plynů .....	11
5.3	Méně plastového odpadu .....	12
<b>6</b>	<b>Biodegradabilní plasty v procesech nakládání s odpady</b> .....	13
6.1	Výskyt bioplastů v odpadech .....	13
6.2	Bioplasty v koncových odpadních zařízeních.....	14
6.2.1	Recyklace konvenčních plastů .....	14
6.2.2	Kompostárna .....	16
6.2.3	Bioplynová stanice .....	19
6.2.4	Zařízení pro energetické využití odpadů, spalovna odpadů .....	20
6.2.5	Skládka .....	22
6.3	Nakládání s bioplastovým odpadem.....	24
6.3.1	Recyklování s konvenčními plasty.....	24
6.3.2	Kompostování .....	25
6.3.3	Anaerobní digesce .....	27
6.3.4	Spalování .....	28
6.3.5	Skládkování .....	28
<b>7</b>	<b>Budoucnost bioplastů v odpadovém hospodářství</b> .....	28
7.1	Návrhy řešení .....	28
7.2	Vlastní (oddělená) recyklace.....	30
7.3	Optimální použití.....	32
<b>8</b>	<b>Závěry</b> .....	34
<b>9</b>	<b>Použitá literatura</b> .....	36

# 1 Abstrakt

Plasty jsou v současné době široce rozšířeným materiálem. Jejich nevýhodou je ale špatná ekologická udržitelnost. Od 70. let jsou proto hledány materiály nové, které by je dokázaly nahradit. Jako nejúspěšnější se jeví výroba takzvaných biodegradabilní plastů (nebo obecně bioplastů). Získáváme je převážně z rostlinných substrátů, mají velkou diverzitu (300 typů) a poměrně rozdílné vlastnosti. V současné době se začínají zavádět do praxe, jejich produkce ale zatím nepřesahuje 1 % celkové výroby plastů.

Práce se zabývá otázkou, jak s těmito materiály nakládat po skončení jejich životnosti. V první části je nastíněno chování biodegradabilních plastů v jednotlivých koncových zařízeních a důsledky z něj vyplývající. Cílem je vybrat tu nejlepší variantu možné likvidace. Z porovnání recyklace s konvenčními plasty, s kompostováním, anaerobní digescí, spálením nebo uložením na skládku vychází jako nejvýhodnější směřovat jejich odpadní tok do zařízení na energetické využití odpadu. Několik bioplastů dobře degraduje v aerobních podmínkách kompostáren nebo anaerobních reaktorech bioplynových stanic. Plošná likvidace univerzálním způsobem je ale z důvodu rozdílných vlastností možná jen procesem spálení.

Druhá, závěrečná část práce se věnuje optimalizaci fungování biodegradabilních plastů v systému nakládání s odpady. Diskutována jsou různá potenciální řešení problematiky včetně vlastní (oddělené) recyklace. Jako nejperspektivnější se jeví tyto materiály aplikovat v obalových technologiích či výrobcích na jedno použití.

**Klíčová slova:** biodegradabilní plasty, odpad, systém nakládání s odpady

## **Abstract**

Plastics are currently widely used material. Their disadvantage is bad environmental sustainability. Therefore, since the 1970s new materials have been searched for that would be able to replace the old ones. The most successful is the production of so-called biodegradable plastics (or in general bioplastics). We get them mainly from plant substrates, they have great diversity (300 types) and quite different properties. Currently they have been implemented into practice but their production does not exceed 1% of total plastic production so far.

The thesis deals with the question how to handle these materials at the end of their life.

In the first part the behaviour of biodegradable plastics in particular end devices and their consequences are outlined. The objective is to choose the best possible disposal option.

Comparing recycling with conventional plastics, composting, anaerobic digestion, incineration or landfilling, the best option is to lead their waste stream to energy recovery facilities. Several bioplastics degrade well in aerobic conditions of composting plants or anaerobic reactors of biogas plants. However, surface disposal in a universal way is possible due to different properties only by the burning process.

The second, final part deals with the optimization of the operation of biodegradable plastics in the waste management system. Various potential solutions including (separate) recycling are discussed. The most promising seems to apply these materials in packaging technologies or disposable products.

**Key words:** biodegradable plastics, waste, waste management system

## 2 Seznam použitých zkratk

- ASTM – American Society for Testing Materials (Americká společnost pro testování materiálů)
- BRO – biologicky rozložitelný odpad
- BRKO – biologicky rozložitelný komunální odpad
- ČOV – čistírna odpadních vod
- EU – Evropská unie
- ISO – International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
- LCA – Life cycle assesment (posouzení životního cyklu)
- PA – polyamid
- PBAT – polybutyrát adipát tereftalát
- PBS – polybutylen sukcinát
- PCL – polykaprolakton
- PE – polyethylen
- PEF – polyethylen furandekarboxylát
- PET – polyethylentereftalát
- PP – polypropylen
- PS – polystyren
- PHA – polyhydroxyalkanoáty
- PHB – polyhydroxybutyrát
- PHBV – polyhydroxybutyrát-valerát
- PLA – polylactid acid (polymléčná kyselina)
- PUR – polyuretany
- PVC – polyvinylchlorid
- TPS – thermoplastic starch (termoplastický škrob)
- ZEVO – zařízení na energetické využití odpadu

### 3 Úvod

Plastové materiály jsou v současné době nezastupitelnou surovinou. Jejich využití zahrnuje snad všechna odvětví lidské činnosti. Jen v roce 2015 jich bylo vyrobeno 322 milionů tun. Ceněny jsou především pro své výborné zpracovatelské vlastnosti, korozní odolnost, stálost, minimální elektrickou vodivost a pro širokou škálu dalších výhod (např. nízkou cenu) (plasticseurope.org, 2016). Jako problémová se ale jeví jejich ekologická udržitelnost. Získáváme je z fosilních zdrojů, jejichž rezervoár je omezený. Při jejich výrobě vzniká značné množství skleníkových plynů. Nepodléhají biodegradaci, závažnou otázkou tedy představuje skládkování plastového odpadu (Álvarez-Chávez et al., 2012).

Od 70. let minulého století se tak objevují snahy nahradit plasty nějakou udržitelnější alternativou. Z technického hlediska je velmi úspěšná syntéza a aplikace tzv. biodegradabilních plastů, které zaznamenáváme zhruba posledních 20 let. Jedná se o polymery vyrobené z přírodních materiálů, zejména z rostlinné biomasy (Khoramnejadian et al., 2011). Jejich výrobci deklarují podobné vlastnosti jako u konvenčních plastů anebo přidávají schopnost samovolně se rozkládat v přírodě. Uplatnění tyto „bioplasty“ nacházejí především v obalových technologiích, následuje automobilový průmysl, elektroprůmysl a lékařství. V současné době zaujímají 1 procento z celkové výroby plastových materiálů. Tento podíl se má však výrazně zvyšovat – v mnoha zemích jsou přijímány politické programy výrazně podporující ekologicky udržitelné technologie (european-bioplastics.org, 2016).

S každým udržitelným výrobkem je třeba po skončení životnosti odpovídajícím způsobem naložit. Zdá se, že právě tato otázka je v souvislosti s biodegradabilními plasty poměrně nedořešená. Již nyní se jeví jako velmi aktuální, s narůstajícím využitím bioplastů pak bude ještě významnější (Vörös, 2013).

Ve své práci se budu touto problematikou zabývat hlouběji. Zhodnotím výhody a nevýhody jednotlivých odpadních toků a koncových zařízení v souvislosti s biodegradabilními plasty. Cílem mé práce pak je zodpovědět otázku, zda jsou biodegradabilní plasty z hlediska systému nakládání s odpady výhodnou komoditou nebo spíše přítěží. Dále také objasnit podmínky, za kterých se tak děje a diskutovat řešení k optimalizaci problému.

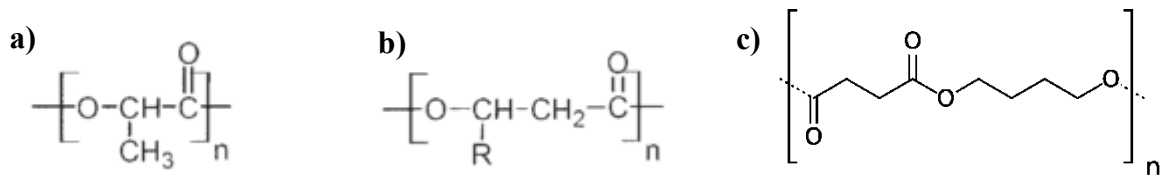


## 4 Bioplasty – členění

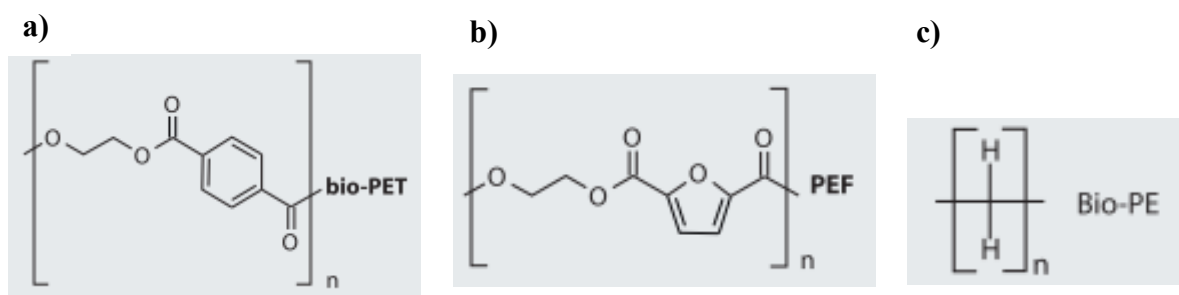
Bioplasty jsou typické velkou rozmanitostí – v současné době existuje okolo 300 variant produktů, které se liší zejména zdrojovým materiálem nebo způsobem degradace či rozpadu. Při jejich hodnocení jsou často směřovány dva základní faktory: složení (tedy, zda se jedná o polymery vyrobené z obnovitelných zdrojů) a způsob konečného nakládání s odpadem (biodegradabilní, kompostovatelné plasty). Biodegradabilní plasty nejsou vždy vyrobeny z obnovitelných zdrojů. Naopak tradiční plasty na bázi ropy mohou být v přírodě rozložitelné. Mnoho produktů z bioplastů také obsahuje významný podíl ropných složek, většinou okolo 50 % a v některých případech dokonce 80 %. Důvodem je zlepšení technických vlastností výrobku a snížení jeho ceny (bioplasty jsou dražší než konvenční plasty). Pro pochopení, jakým způsobem tyto materiály mohou ovlivnit odpadové hospodářství, je vymezení výše uvedených pojmů zcela zásadní (Krása, 2016). S výjimkou této kapitoly budou spíše užívány jako synonyma.

Mezi nejvýznamnější biodegradovatelné plasty patří PLA, PHA (PHB), škrobové polymery (TPS), PBS, PBAT a další. Bio-PET, PA, PEF, bio-PE, PUR a jiné jsou zástupci skupiny vyrobené z přírodních zdrojů (stejně jako u plastů biodegradabilních), ale s omezenou rozložitelností. (european-bioplastics.org, 2016). Substrátem pro výrobu bioplastů je nejčastěji kukuřičný škrob, sója, cukrová třtina nebo celulóza. V zásadě existují 3 způsoby, jak je připravit. Prvním z nich je modifikace přírodních polymerů, zejména celulózy a škrobu. Takto se vyrábí např. TPS, kdy jsou právě škrobové granule mixovány za tepla s přítomností plastifikátoru. Druhou možností je chemická polymerace monomerů získaných z rostlinné biomasy. Sem patří většina bioplastů, jedná se o přeměnu přírodního substrátu většinou pomocí bakterií (anaerobní fermentace) na výchozí monomery a jejich následnou polymeraci. V případě PLA je prvotní surovinou kukuřičný škrob, který je hydrolyzován na glukózové jednotky, z nichž bakterie vytvoří kyselinu mléčnou pro polymeraci. Příprava bio-PE je zase založena na prosté dehydrataci přírodního etanolu na etylen. Poslední a nejsložitější způsob zahrnuje přímou biosyntézu polymeru uvnitř těl bakterií. Touto cestou se vyrábějí PHA. Bakterie zpracovávají rostlinný zdroj a množí se, bioplasty jsou z nich poté extrahovány a dosušeny. Je-li bioplast heteropolymerní povahy (více různých monomerů), bývá běžnou praxí jeden monomer získat ze zdroje přírodního a druhý z fosilního (např. bio-PET nebo (bio)PUR) (Yates & Barlow, 2013, Storz & Vorlop, 2013, Sudesh & Iwata, 2008). Chemické vzorce některých bioplastů a množství jejich produkce uvádí obrázky 1, 2, 3 a 4.

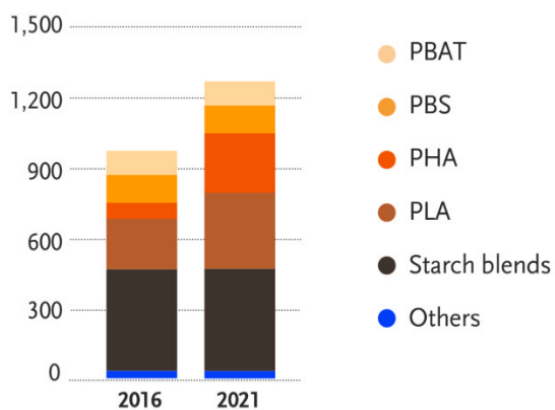
Z hlediska chemického procesu syntézy lze bioplasty klasifikovat stejně jako jejich ropné protějšky na polymery (např. bio-PE), polykondenzáty (PLA, PHA, PA, PBAT, PBS, bio-PET) nebo polyadukty (PUR) (Soroudi & Jakubowicz, 2013).



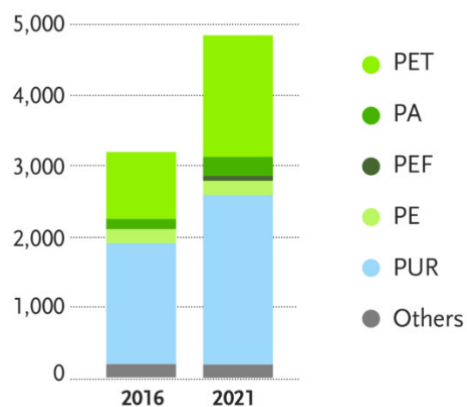
**Obr. 1:** Struktura některých biodegradabilních plastů: a) PLA, b) PHA, c) PBS (Kale et al., 2007, wikipedia.org, 2017)



**Obr. 2:** Struktura některých bioplastů z přírodních zdrojů: a) bio-PET, b) PEF, c) bio-PE (Storz & Vorlop, 2013)



**Obr. 3:** Množství vyrobených biodegradabilních plastů v roce 2016 versus odhad produkce v roce 2021. Uvedené údaje jsou v tisících tun. (starch blends = směsi na bázi škrobu, others = ostatní) (european-bioplastics.org, 2016)



**Obr. 4:** Srovnání produkce plastů založených na přírodní bázi v roce 2016 s předpokládanou produkcí v roce 2021. Údaje jsou uvedeny v tisících tun. (Others = ostatní) (european-bioplastics.org, 2016)

## 5 Proč používat bioplasty?

V následujících odstavcích jsou shrnuty 3 nejčastěji udávané výhody ve spojitosti s ekologickou udržitelností bioplastů.

### 5.1 Úspora fosilních zdrojů

Spotřeba konvenčních plastů (a tak i spotřeba neobnovitelných surovin) se každým rokem rapidně zvyšuje (Comani et al., 2015). Ačkoli momentálně zaujímá „pouze“ 5 % produkce fosilních surovin (Vörös, 2012), je žádoucí substituovat plasty vhodnou alternativou, chceme-li dostát principům trvale udržitelného rozvoje. Aplikace bioplastů se tak jeví jako významně pozitivní skutečnost (Comani et al., 2015). K šetření fosilní energie dochází i při procesu výroby. Například syntéza PLA spotřebuje o polovinu méně fosilního paliva než výroba plastů z ropy. Ještě výrazněji je tomu v případě PHA. Zde se jedná o pouhých 3,5 % energie potřebné pro konvenční plasty (Álvarez-Chávez et al., 2012).

Jedinou otázkou však zůstává, je-li vhodné pro výrobu biologických plastů využívat zemědělsky pěstované plodiny. Respektive, je-li vhodné v době potravinové krize, se kterou se potýká značná část lidské populace, využívat ornou půdu pro pěstování průmyslových surovin. Pro tento účel by zřejmě bylo lepší využít zemědělského odpadu rostlinného původu. Ten by tak navíc získal ekonomickou hodnotu (Álvarez-Chávez et al., 2012).

### 5.2 Nízké emise skleníkových plynů

Biologické plasty jsou výhodné i z hlediska skleníkového efektu. Při jejich výrobě vzniká o 30-80% méně skleníkových plynů než při výrobě tradičních plastů (Comani et al., 2015). V případě PLA je to až o 85 % méně CO<sub>2</sub>. PHA jsou v tomto ohledu k životnímu prostředí vůbec nejšetrnější (Álvarez-Chávez et al., 2012). Některé studie ovšem poukazují na fakt, že s nárůstem využití bioplastů bude třeba pěstovat jejich rostlinné zdroje. Vlivem kultivace půdy se zvýší i emise skleníkových plynů (zejména CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O a CH<sub>4</sub>). Míra vlivu na klimatické změny tak může být podhodnocena (Piemonte & Gironi, 2011). Tento názor podporuje i konkrétní studie porovnávající emise vzniklé během výroby PET a emise z výroby jejího biologického substituentu – PEF. Při zanedbání emisí z obhospodařování půdy se jednalo o ušetření 43-54 % skleníkových plynů při produkci bioplastu. Po jejich zahrnutí do výpočtu se hodnota snížila na 30-38 % (Eerhart et al., 2012).

Za předpokladu, že bude s bioplasty po skončení životnosti naloženo tak, aby se jako každá biomasa ideálně přeměnily na oxid uhličitý a vodu, můžeme jejich životní cyklus klasifikovat jako uhlíkově neutrální. Zdroj uhlíku pro jejich vznik je totiž CO<sub>2</sub> z ovzduší, který je

fixován rostlinným zdrojem při fotosyntéze. Podíl CO<sub>2</sub> vydaný při zániku bioplastu je ekvivalentní právě tomuto množství. Celý systém tak nevydá více skleníkového plynu CO<sub>2</sub>, než spotřeboval (pokud samozřejmě zanedbáme zmíněné emise z kultivace půdy) (Philp et al., 2013).

### 5.3 Méně plastového odpadu

Každoročně vzniká po celém světě 34 milionů tun plastového odpadu, z něž 93 % končí na skládkách nebo v oceánech (Emadian et al., 2016). Řešení situace má přijít v roce 2024, kdy začne v EU platit úplný zákaz skládkování využitelných složek komunálního odpadu, tedy i plastů (Vörös, 2014). Jejich biodegradabilita (samovolný rozklad vlivem mikrobiální činnosti nebo biologických procesů obecně) je totiž velmi nízká. Bakterie a houby, které depolymeraci a následnou mineralizaci polymerů zajišťují, nedisponují vhodnými enzymy (Shah et al., 2008). Plasty z biodegradabilních materiálů se tak jeví jako řešení tohoto problému. Díky jejich rozložitelnosti by se mohlo snížit jednak množství odhozených plastových odpadků v přírodě (tzv. littering), jednak obecně množství plastového odpadu ukládaného na skládky (Khoramnejadian et al., 2011).

V případě marinního znečištění je situace kritická – na severní polokouli v Tichém oceánu se nacházejí celé pásy odpadních plastů známé jako Great garbage patch. Představují významné riziko pro mořskou biotu. Využívání biodegradabilních polymerů, namísto těch konvenčních by mělo mít i na tuto problematiku pozitivní dopad. Díky lepší rozložitelnosti by se mělo množství akumulovaného odpadu snížit (Philp et al., 2013). V případě širokého rozšíření plastů z obnovitelných zdrojů také můžeme očekávat odlišení odpadního toku od konvenčních plastů - a tak i fakt, že neskončí jako plasty vyráběné z ropy (Cornell, 2007).

Všechny tyto skutečnosti jsou podnětem pro podrobnější zkoumání degradability bioplastů. Výsledky probíhajících studií se však značně liší, zejména z důvodů variability faktorů, které rozložitelnost v přírodních podmínkách ovlivňují (teplota, vlhkost, pH, dostupnost kyslíku apod.) (Emadian et al., 2016). Některé z nich udávají míru degradace mezi 80-90 % za období 10-12 měsíců, materiál je tedy považován za biodegradabilní (Ardisson et al., 2014, Arcos-Hernandez et al., 2012). Jiné ale referují o opaku. Bioplasty se podle nich rozkládají ve stanoveném čase jen z několika procent (spíše pouze fragmentují) a rozhodně pomaleji, než slibují výrobci. Deklarované podmínky rozkladu nastávají totiž v přírodě naprosto ojediněle (Adamcová & Vaverková, 2016, Lipavský et al., 2016).

Co však biodegradabilním plastům v porovnání s těmi konvenčními upřít nelze, je jejich ekotoxikologická nezávadnost. Při svém rozkladu neuvolňují škodlivé látky (Ardisson et al., 2014).

## **6 Biodegradabilní plasty v procesech nakládání s odpady**

### **6.1 Výskyt bioplastů v odpadech**

Bioplasty se mohou primárně vyskytovat v následujících skupinách odpadů (podle katalogu odpadů – vyhláška č. 93/2016 Sb.):

**02 01 04 (Odpadní plasty, kromě obalů)** – Zbytky biodegradabilních fólií používaných pro pěstování plodin v zemědělství (fólie pro překryv, pro postupné uvolňování hnojiv nebo látek proti škůdcům).

**15 01 02 (Plastové obaly)** – Do této skupiny řadíme různé druhy použitých obalů v potravinářství, průmyslu, obchodním sektoru apod. Jedná se o složku standardního tříděného sběru plastů v obcích nebo vytríděné plastové obaly vzniklé při podnikatelské činnosti.

**Skupina 19 (Odpady ze zařízení na zpracování odpadů)** – Zde mohou bioplasty vznikat jako výměty z dotřídňovacích linek, zbytky z prosévání kompostu, pevný výstup z anaerobní digesce v bioplynové stanici atd.

**20 01 08 (Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven)** – Především jednorázové nádobí z biologických plastů (kelímky, vaničky, příbory, tácky, ...).

**20 01 39 (Plasty)** – Bioplasty se vzhledově nijak neliší od tradičních plastů. Mohou se tak dostat do jejich tříděného sběru v obecních systémech nakládání s odpady. V tomto případě to budou zejména láhve, odnosné tašky, fólie a další.

**20 02 01 (Biologicky rozložitelný odpad)** – Pokud budou občané využívat biodegradabilní tašky nebo pytle pro shromažďování bioodpadů v domácnostech, mohou se bioplasty stát součástí této skupiny odpadů. Jedná se o oddělený sběr biologicky rozložitelných odpadů.

**20 03 01 (Směsný komunální odpad)** – Nebudou-li bioplasty vytríděny v rámci odděleného sběru, dostanou se do směsného komunálního odpadu.

**20 03 03 (Uliční smetky)** – Nepodložené informace o samovolném rozpadu biologických plastů mohou spotřebitele uvést v omyl, takže je zanechá ležet ve volné přírodě. Stanou se tak součástí volně odhozených odpadků (Krása, 2016).

## 6.2 Bioplasty v koncových odpadních zařízeních

Aby bylo možné zhodnotit správné zacházení s bioplasty po skončení jejich životnosti, je nejprve nutné popsat jejich chování v konkrétních koncových zařízeních (Krása, 2016).

### 6.2.1 Recyklace konvenčních plastů

V současné době rozlišujeme 3 typy recyklace plastových výrobků. Fyzikální, chemickou a surovinovou recyklaci. Princip té fyzikální, známé také pod názvy mechanická nebo materiálová, spočívá v úpravě polymerního materiálu drcením, praním či mletím a jeho následném uvedení do stadia taveniny. Z té je pak běžnými technologiemi (vytlačovací, vstřikovací stroje, extrudéry) s přísádkami aditiv a čistého polymeru vyroben plastový produkt. Jedná se o nejučinnější využití. To vše jsou příčiny toho, že tento typ je dnes nejčastěji aplikovanou formou recyklace. Nevýhodou je požadavek na vysokou kvalitu (čistotu) vstupní suroviny. Pokud mechanicky recyklujeme směsný polymerní odpad, dojde ke zhoršení užitečných vlastností (Ignatyev et al., 2014).

Při chemické recyklaci se využívá degradačních mechanismů, aby byl materiál rozložen zpět na monomery. Tento typ je vhodný zejména pro polymery s hydrolyzačním rozkladem v přírodě (polykondenzáty, polyadukty). Degradačním činidlem může být voda (hydrolyza PET, PA), alkohol (alkoholýza PET, PUR), amin (aminolýza PUR) nebo kyselina (acidolýza). V porovnání s fyzikální recyklací se jedná o složitější technologické procesy, snad s výjimkou alkoholové glykolýzy (např. PUR), která je poměrně nenáročná technologicky i ekonomicky (Geyer et al., 2016).

V případě velké směsi plastového odpadu se přistupuje k surovinové recyklaci. Jejím výsledkem nejsou monomery, nýbrž nízkomolekulární látka, kterou nelze polymerovat. Využívá se pak jako ropná surovina, palivo, apod. Takového výsledku se dosahuje pyrolyzními, hydrogenačními nebo zplyňovacími metodami, které jsou ze všech zmíněných technologií nejsložitější a i nejnákladnější (Ignatyev et al., 2014).

Samostatnou kapitolu tvoří identifikace typu plastů z odpadu a jejich separace před vlastní mechanickou recyklací. Mimo manuálního dotřídění se využívá např. takzvané flotace, při které dochází k rozdělení polymerů ve vodní lázni na základě jejich rozdílné hustoty. V kombinaci s odstředivou silou je dosaženo situace, kdy na hladině plavou polyolefiny (PP a PE) a ke dnu klesá PET, PVC nebo PS. Tato metoda je poměrně jednoduchá ale z důvodu nízké účinnosti je nutné ji několikrát opakovat za použití surfaktantů (zajištění lepší smáčivosti povrchu). Mezi další používané způsoby, jak zvýšit čistotu recyklátu, patří např. vzduchová separace (odstranění lehkých částí jako jsou etikety, prach), triboelektrická metoda (rozlišení typu plastů pomocí elektrostatického nabíjení) a několik typů optických metod (Lettieri & Baeyens, 2009).

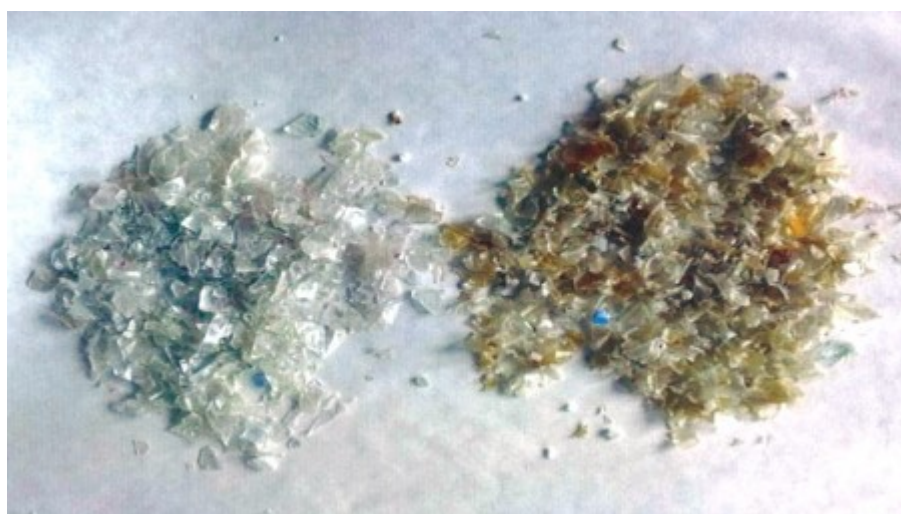
Vzhledem k tomu, že výrobky z bioplastů jsou vzhledově stejné jako produkty z tradičních polymerů, jejich výskyt v plastových recyklačních tocích můžeme očekávat. Recyklační průmysl je v současné době velmi rozvinutý a úzce specializovaný odvětví. Vnesením cizího elementu tak vznikají jistá omezení (Krása, 2016). Předně jsou to problémy při již zmíněné flotaci. Hustota biologických plastů zhruba odpovídá hustotě PET, a proto je od sebe nelze separovat (Müller et al., 2014). Z hlediska zpracovatelů vyříděných plastů se tak objevuje problém, bioplasty výrazně kontaminují recyklát. A požadavky odběratelů jsou v tomto ohledu skutečně vysoké (Cornell, 2007). Zvláště zřetelná je tato nevýhoda při recyklaci PET, který je nejcennější součástí tříděného sběru plastů. PET vločky jsou jako druhotná surovina dodávány s garantovanou kvalitou. Ta je také ověřována laboratorně – vločky procházejí například tepelným zátěžovým testem (teplota 200 °C v laboratorní peci po dobu 30 minut, teplota tavení PET je 267 °C). Nežádoucí částice ve směsi působením takto vysokých teplot žloutnou a degradují (obrázek 3) (Krása, 2016). Kvalita recyklovatelného materiálu se zhoršuje, už když je kontaminován přítomností 0,1 % PLA (Vaněk et al., 2013). Výrobci plastů proto požadují příměs jiných polymerů pouze do úrovně 100 ppm. Pokud by byla vyšší, došlo by k naprosté degradaci konečného výrobku. Bioplasty mají totiž podstatně nižší teplotu tání (tavení) než PET, PE nebo PS (Šťastná, 2016). Při zchlazování a tuhnutí tak budou stále ve stadiu taveniny. V praxi silně utrpí tažnost, barva plastu a jeho tepelné nebo krystalické vlastnosti (Cornell, 2007). I malý výskyt biodegradabilního polymeru tak ohrozí recyklaci mnohem většího objemu kvalitní suroviny, jakou je např. PET (Šťastná, 2016).

Ne vždy však musí docházet k takto dramatickým situacím. Jako pozitivní příklad společné recyklace bio a fosilního plastu lze uvést láhev firmy Coca Cola představenou v roce 2009 (Krása, 2016). Ta se skládá z klasického PET (70 %) a příměsí přírodního bio-PET (30 %) (Vörös, 2013). Oba polymery mají identickou chemickou strukturu (ethylenglykol + kyselina tereftalová), ale jiný zdroj. Respektive, bio-PET vzniká kondenzací rostlinného ethylenglykolu a kyseliny tereftalové, která pochází z ropy. Technicky totiž není jednoduché vyrobit zmíněnou kyselinu z přírodního substrátu. Celkové množství přírodního uhlíku v produktu tak odpovídá asi 20 % (Storz & Vorlop, 2013). V tomto případě se může přistoupit ke společné recyklaci, aniž by utrpěla kvalita druhotné suroviny. Podmínkou ovšem je, že právě ty monomery z rostlinných zdrojů mají stejnou chemickou strukturu a čistotu jako doposud používané monomery ze zdrojů fosilních (Vörös, 2013).

Ani chemické recyklaci se z tohoto pohledu problémy nevyhnou. Opět bude docházet k poklesu kvality zrecyklovaného materiálu. Podrobnější důsledky stále nejsou dostatečně prozkoumány. Zdá se však, že vzájemná separace např. PLA a PET by nemusela být příliš složitá. Za použití octanu zinečnatého byl totiž při alkoholýze polymerní směsi pozorován vznik

tekutých methyllaktátů a stále pevného nerozloženého PET. Obě dvě látky se pak lehce oddělily filtrací. Tato metoda by navíc mohla být teoreticky použita i pro separaci dvou zmíněných plastů před fyzikální recyklací (Carné Sánchez & Collinson, 2011).

Ještě jedna technologie vykazuje dobré výsledky ohledně roztřídění bio a nebio plastů. Jedná se o optickou metodu – tzv. NIR (near infrared). Je založena na detekci záření v oblasti blízké infračervenému. Každý materiál odráží dotyčné záření jinak, NIR senzor podle toho složí typ, obraz a umístění předmětu a vydá pokyn pro odstranění (Cesetti & Nicolosi, 2016). V současné době se této metody okrajově využívá např. pro oddělení PET a PE (Soroudi & Jakubowicz, 2013). Experimenty ukázaly, že schopnost senzoru identifikovat a vytřídit PLA je relativně vysoká, je to 93 % (Müller et al., 2014).



**Obr. 5:** PET vločky před tepelným zátěžovým testem a po něm. Vysoká kontaminace biopolymery způsobuje viditelné žloutnutí (Krása, 2016).

## 6.2.2 Kompostárna

Zpracování biologicky rozložitelných odpadů v kompostárnách nebo bioplynových stanicích využívá již zmiňovaného procesu biodegradace (Gómez & Michel, 2013). Mikrobiální rozklad polymerů závisí na prostředí, ve kterém probíhá a také na chemické povaze plastu. Hlavním degradačním mechanismem je hydrolyza – působení vody. K té jsou náchylné zejména polykondenzáty, protože obsahují polární hydrolyzovatelnou skupinu (esterová, amidová, nitrilová). Většina bioplastů tak tomuto mechanismu podléhá. Dalšími faktory jsou teplota, pH, dostupnost kyslíku nebo výskyt konkrétních bakterií, hub (biodegradace má svou enzymatickou složku). Biodegradabilitu ovlivňuje i stupeň krystalizace plastu. Určité procento polymerní struktury je totiž amorfní, a právě do těchto oblastí voda dobře proniká. Nelze také opomenout molekulovou hmotnost. Čím je nižší, tím rychleji bývá plast rozložen. V poslední řadě hraje



důležitou úlohu i přítomnost plastu v kopolymeru s jiným plastem. Pokud je jeden z polymerů dobře hydrolyzovatelný, celý kopolymer rychleji degraduje. Pokud však obsahuje např. aromatickou strukturu, kopolymer se rozkládá pomaleji. Výsledkem procesu je rozštěpení řetězců za vzniku H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> nebo CH<sub>4</sub> a anorganických živin (Kale et al., 2007).

Kompostování je více či méně řízený proces mikrobiálního rozkladu organických látek za přístupu kyslíku. Dodržení určitých teplot po danou dobu má při něm zásadní význam, dosahuje se hygienizace (zničení patogenních organismů). Podle typu zařízení a zpracovávaného substrátu se minimální teplota pohybuje od 45 °C po 65 °C (termofilní fáze) po dobu nejméně 5 až 21 dní. Celý proces pak trvá minimálně 60 dní (existují výjimky – např. zpracování rostlinných tkání je kratší). Nezbytného provzdušnění se dosahuje překopáváním. Do kompostovacích zařízení putuje široké spektrum bioodpadů, např. kaly z ČOV, odpady ze zemědělství, lesnictví, potravinářského nebo papírenského průmyslu či odpady z údržby veřejné zeleně (Vyhláška č. 341/2008 Sb.). Pro optimalizaci procesu je ideální poměr C:N v substrátu 30:1. Vlhkost, pH a velikost částic jsou další faktory, které kompostování ovlivňují (Kale et al., 2007). Výsledkem je stabilizovaný výstup – kompost. Ten se využívá při rekultivacích, k úpravě terénu nebo hnojení (Vyhláška č. 341/2008 Sb.). Podle podmínek a objemu zpracovávaného bioodpadu můžeme rozdělit kompostování na domácí, komunitní a průmyslové. Konkrétní technologie se pak označují jako rozklad v pasových hromadách, speciálních vacích nebo uzavřených biofermentorech apod. (Kijchavengkul & Auras, 2008).

Některé plastové a bioplastové výrobky jsou označovány jako biodegradabilní, jiné jako kompostovatelné. V této definici je zásadní rozdíl. Kompostovatelný produkt se rozkládá v řízeném kompostování stejně jako jiné materiály pro tento proces určené (rostlinné tkáně, živočišné zbytky, ...). Klasifikace biodegradabilní pak představuje rozklad v širším slova smyslu. Tedy každý kompostovatelný plast je biodegradabilní, nikoli však naopak (Kale et al., 2007). Obě dvě vlastnosti jsou u bioplastů v současné době intenzivně zkoumány (Cosate & Patri, 2016).

Pokusy s PLA ukazují, že tento biopolymer, není-li v kopolymeru s jiným, degraduje v podmínkách kompostu poměrně spolehlivě. Vybrané láhve a vaničky byly kompostovány 45 dnů v pásových hromadách. Teplota procesu se udržovala větší než 60 °C po počátečních 21 dní, vlhkost základky dosahovala 65 % a pH hodnoty 8,5. Na konci experimentu nebyly zbytky polymeru okem rozpoznatelné, přičemž se ukázalo, že optická izomerie kyseliny mléčné má vliv na rychlost rozpadu. Produkty s vyšším zastoupením D-mléčné kyseliny degradovaly rychleji než ty, které se skládaly především z L-izomeru (Kale et al., 2006). Podobných výsledků dosáhly výrobky na bázi PLA při experimentech v uzavřeném kompostéru. Aktivní aerace a vyhřívání na teplotu 60-70 °C vyústilo v rozklad vzorků již za 14-28 dní (Lipavský et al., 2016). I Testování

PHB a čistě přírodního PHBV dopadlo uspokojivě. V uzavřeném fermentoru se tyto biodegradabilní plasty rozkládají za 40 dní (po 105 dnech už neexistovaly fragmenty větší než 2 mm). pH se při pokusu pohybovalo mezi 6,5 a 8,2 a termofilní teploty bylo dosaženo prvních 20 dnů degradace (Weng et al., 2010).

Čím větší podíl bioplastového produktu však zaobírá příměs fosilního polymeru, tím je jeho rozklad v kompostu horší (Vaverková et al., 2012). To lze dobře demonstrovat na příkladu přírodních polyuretanů. Jedná se o sloučeniny izokyanátů a násobných alkoholů spojené polyadičním mechanismem. Právě násobné polyoly jsou vyráběny z rostlinných zdrojů a přidávány k ropným izokyanátům. Při pH 8,2 a teplotě 55 °C celý kopolymer degraduje asi z 13 % za 50 dní. V porovnání s kompletně fosilními PUR je to ale stále více, těch se za stejnou dobu v uzavřeném reaktoru rozložila pouhá 4 procenta. Pozitivní kontrola v podobě celulózy přitom vykazala biodegradaci 77 % (Gómez et al., 2014). K podobným závěrům došla studie zkoumající kompostování jiných kopolymerů v pásových hromadách. Některé z materiálů, certifikované jako kompostovatelné, nezměnily svůj vzhled ani po třech letech procesu. Deklarované podmínky rozkladu jsou totiž těžko dosažitelné. Odpovídají spíše uzavřeným fermentorům než běžnému prostředí komunitní kompostárny (Lipavský et al., 2016). Stejně špatně vypadá degradace polymerů s přidavkem aditiv, která mají vylepšit či podpořit rozklad. Materiály většinou fragmentují na menší kousky, ale ty pak zůstávají v kompostu beze změny (Vaverková et al., 2012).

Předpokladem pro úspěšné rozložení je dost často předúprava biodegradabilního materiálu před samotným procesem kompostování. Jde především o rozdrcení nebo nasekání na kousky, což je důležité zejména u hůře degradovatelných materiálů – např. dřevní hmoty (a ve své podstatě i biopolymerů) (Kale et al., 2007). Někteří výrobci bioplastů takové nakládání dokonce označují jako podmínku pro rozpad (Lipavský et al., 2016). Potom co se tak stane, bioplasty nijak negativně neovlivňují kvalitu vzniklého kompostu. Případné nerozložené větší fragmenty zachytí síta při závěrečném přesívání (Unmar & Mohee, 2008).

Je nutné ještě doplnit, že celou problematiku testování degradace a kompostování upravuje několik různých norem. V našich podmínkách se jedná především o evropskou normu EN 13432, která stanovuje požadavky na obal využitelný k průmyslovému kompostování. Podle ní se musí za maximální dobu šesti měsíců a teploty 58 °C (+/- 2 °C) rozložit 90 % biodegradabilního odpadu (Krása, 2016). Obdobné podmínky ukládá americká norma ASTM D6002 nebo standardy ISO 14855 a ISO 16929. Ty na degradaci z rovněž 90 % ponechávají čas 45-180 dní (Kale et al., 2007). Žádný ze jmenovaných předpisů však úplně přesně neodpovídá nakládání s bioplasty v praxi. Jeden se věnuje kompostování obalů obecně (tedy i např. papírovým obalům), jiný naopak rozložitelnosti (špatně rozložitelných) plastů. Další zase

nastavuje podmínky pro průmyslové kompostování, ale nepamatuje na komunitní nebo domácí. Předepsané testovací metody navíc často pouze simulují reálné podmínky v laboratorním měřítku (Kijchavengkul & Auras, 2008).

### 6.2.3 Bioplynová stanice

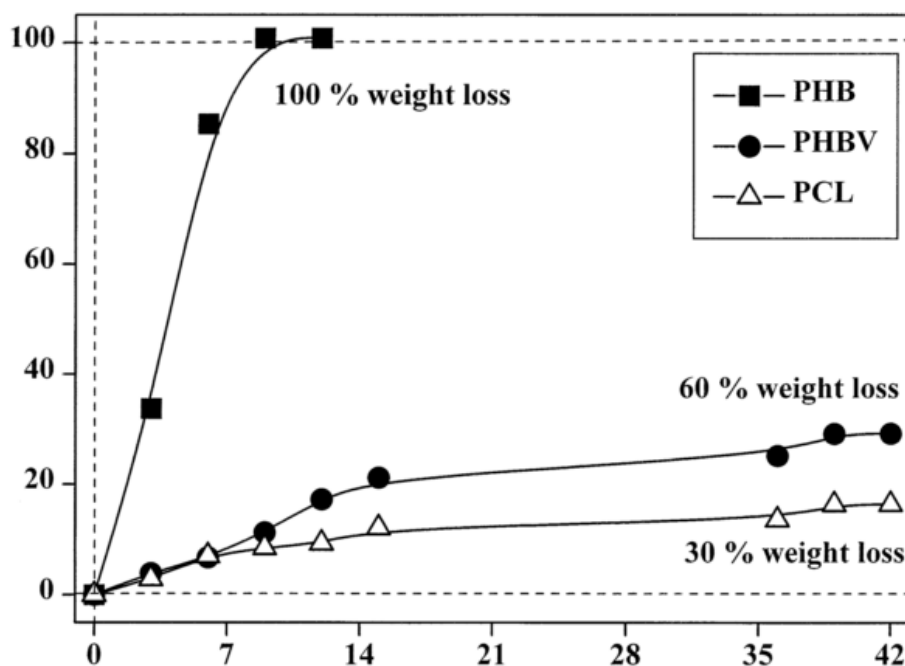
Bioplynová stanice je zařízení na zpracování biologicky rozložitelného odpadu (BRO) technologií anaerobní digesce. Jedná se o proces řízeného mesofilního nebo termofilního mikrobiálního rozkladu organických látek bez přístupu vzduchu. Teplota zpracovávaného BRO musí být nejméně 55 °C, nepřerušena po dobu 24 hodin. Výjimku tvoří rostlinné tkáně nebo teplotně předupravené BRO. Celková délka procesu je větší než 30 dní. Při digesci vzniká tzv. bioplyn (především CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>) a kapalný digestát (nebo rekultivační digestát) (Vyhláška č. 341/2008 Sb.). Metan z bioplynu se využívá k výrobě elektrické a tepelné energie (případně chladu) a digestát jako hnojivo nebo k rekultivaci. Bioplynové stanice můžeme rozdělit podle typu zpracovávaných substrátů na „zemědělské“ (zpracovávají cíleně pěstované plodiny, odpady ze zemědělství), „čistírenské“ (substráty jsou kaly z ČOV) a „odpadářské“ (využití odpadů z průmyslu, BRKO) (european-biogas.eu, 2013).

Právě v odpadech pro zemědělské a odpadářské stanice se mohou objevit biologické plasty. Zde je samozřejmě důležité, aby byly spolehlivě biodegradabilní (Krása, 2016). To komplikuje i fakt, že komerční produkty jsou často směsí rozložitelných a konvenčních plastů. Rychlost jejich rozkladu je v anaerobním prostředí pomalejší než při aerobním kompostování (Gómez & Michel, 2013). Významnou roli při tom hraje teplota. Prováděné pokusy totiž ukázaly že, při 35 °C (mesofilní rozklad) degradace polymerů na bázi škrobu téměř nezačala. Naopak při 55 °C (termofilní rozklad) byl brzy pozorován rychlý rozpad testovaného produktu. Velmi podobný průběh měl experiment s PLA. Při 55 °C se rozložila z 90 % (za 60 dní), zatímco za mesofilní teploty nebyla 55 dní pozorována žádná změna (Yagi et al., 2009). Potvrzuje se také, že předchozí fragmentace materiálu má při digesci vliv na rychlost rozkladu. Menší částice s nižší molekulovou hmotností degradují rychleji (Guo et al., 2011).

Nejlépeších laboratorních výsledků dosahuje PHB. Ve směsích s kaly z ČOV anaerobně degraduje během 9 dnů bezmála ze 100 %. A to i při nižších teplotách (37 °C), jak ukazuje obrázek 5 (Mu & Deckwer, 2001). Naopak velmi nízká míra rozkladu (jednotky procent) byla za podobných podmínek sledována u biologických PUR. Pravděpodobně je opět dána vysokým podílem fosilní příměsi ve struktuře polyaduktu. Přírodní PUR se využívají v zemědělství jako mulčovací nebo jiné fólie a mohly by se tak dostat do zemědělských substrátů bioplynových stanic (Gómez et al., 2014).

Množství vzniklého metanu závisí na mnoha proměnných (typ substrátu, pH, poměr C:N, dostupnost dalších živin a další), také na typu konkrétního biodegradabilního plastu. Teplota procesu je opět důležitým faktorem. Při pokusné digesci se zemědělským odpadem živočišného původu, bylo zjištěno, že škrobové polymery produkují asi 1,2krát více metanu při 55 °C než při 35 °C. V případě stejně testované PLA byl rozdíl dokonce více než dvojnásobný (Vasmara & Marchetti, 2016).

Dostupné výsledky studií závisí na typu použité metody stanovení. V současné době se využívá několika standardů, např. normy ISO 14853. Ta definuje anaerobní degradaci v prostředí s vysokým podílem vody. ASTM D5210 nebo ASTM D5511 zase počítají s digescí v kalech z ČOV nebo naopak v podmínkách na vodu chudých (suchá fermentace). Způsob měření v kalech je zakotven i v české normě ČSN EN ISO 11734. Na základě jejich aplikace se rozklad jednotlivých bioplastů liší (Yagi et al., 2009).



**Obr. 6:** Některé biodegradabilní plasty podléhají v anaerobních podmínkách velmi rychlé degradaci – obrázek porovnává mezofilní rozklad čistého PHB s kopolymerem PHBV (PHB + 11,6 % PHV) a fosilním biodegradabilním polymerem PCL. Osa x znázorňuje procenta degradace a osa y čas měřený ve dnech. K úspěšné degradaci PHBV a PCL by bylo třeba vyšší teploty a vhodnějšího bakteriálního inokula. Enzymatický rozklad PHB je totiž pravděpodobně odlišný od rozkladu PHBV a PCL (Mu & Deckwer, 2001).

#### 6.2.4 Zařízení pro energetické využití odpadů, spalovna odpadů

Využití energetického potenciálu představuje poslední možnost zhodnocení vlastností odpadu (Rossi et al., 2015). Mimo bioplynové stanice se jedná především o jeho spálení a

výrobu elektřiny ze vzniklého tepla. Takový proces probíhá v tzv. ZEVO – zařízení pro energetické využití odpadu (zde končí např. komunální odpad), kde je nejnižší předepsaná účinnost teplotní konverze 65 %. Mluvíme-li o pouhém spálení odpadu bez energetického využití, je na místě používat termín spalovna (takto se odstraňuje např. zdravotnický nebo průmyslový odpad) (Zákon č. 185/2001 Sb.). Aplikace této technologie vede k několika výstupům. Jak již bylo zmíněno, jedná se především o teplo, dále o zbytky po spálení (škvára/struska, popílek) a plynné produkty. Ty pak procházejí komplikovaným systémem čištění (ekonomicky náročnější než samotná spalovna/ZEVO), aby mohly být vypuštěny do ovzduší (Baláš et al., 2014).

Tato zařízení bývají často negativně přijímána veřejností (Rossi et al., 2015). Přesto např. v České republice fungují 4 ZEVO na komunální odpad a 22 zařízení spalující nemocniční příp. průmyslový odpad. V rozvinutějších evropských zemích jsou tato čísla mnohem vyšší (Baláš et al., 2014).

Pokud se v budoucnu biodegradabilní plasty více rozšíří, zaručeně se objeví i v komunálním odpadu. Jejich spálením vzniká CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O (neutrální uhlíkový cyklus) (Philp et al., 2013). Z hlediska energetického potenciálu si ve srovnání s ostatními materiály vedou poměrně dobře, jak lze vidět v tabulce 1 (Vörös, 2013).

<b>Materiál</b>	<b>Výhřevnost (MJ/kg)</b>
Topný olej	43
Uhlí	30
Dřevo	19
Papír	19
PE	45
PP	43
PS	40
PET	22
PVC	18
Bio-PE	44
Bio-PET	22
PHA	24
PLA	19
TPS	19

**Tab. 1:** Kalorická hodnota pro spalování různých materiálů a biodegradabilních plastů (Rossi et al., 2015, Vörös, 2013).

## 6.2.5 Skládka

Odstranění odpadu skládkováním je poslední alternativou, jak se jej zbavit (Rossi et al., 2015). Skládka představuje zařízení určené ke shromažďování a ukládání odpadu na nebo pod úrovní terénu. Její provozovatel má povinnost zabezpečit chod s minimálním dopadem na okolní životní prostředí a budovat finanční rezervu, aby bylo o skládku správně pečováno po jejím uzavření (Zákon č. 185/2001 Sb.). Putují sem různé odpady, jejichž součástí se biodegradabilní plasty mohou jistě stát – jedná se např. o směsný komunální odpad, stavební odpad, zeminu a vůbec jakýkoliv odpad, není-li jeho ukládání zakázáno nebo omezeno legislativními podmínkami. Dle úrovně technického zabezpečení rozlišujeme skládky inertního, ostatního nebo nebezpečného odpadu. Inertní odpad nepodléhá žádným fyzikálním, chemickým či biologickým změnám, nebezpečný vykazuje minimálně jednu z nebezpečných vlastností (uvedené v Nařízení komise (EU) č. 1357/2014). Ostatní odpad může mít nízký obsah organických biologicky rozložitelných látek, pak se odstraňuje na skládky označené S-OO1, nebo naopak vysoký a ukládá se na skládky typu S-OO3 (zde končí komunální odpad). Pro úplnost je ještě nutné doplnit, že mnoho odpadů se skládkovat vůbec nesmí, např. recyklovatelné výrobky, biocidy, léčiva apod. (Vyhláška č. 294/2005 Sb.). Každý odpad je navíc, dle svých vlastností, svázán s definovaným poplatkem za uložení (Zákon č. 185/2001 Sb.).

Odstraněný materiál bývá hutněn těžkými stroji, aby byla plně využita kapacita skládky. Případný rozklad odpadu (zejména BRO) tak probíhá v anaerobním prostředí, kterému předchází krátká perioda dostatku kyslíku. Proto na skládkách vznikají skleníkové plyny, zejména CH<sub>4</sub> (nebo CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O). V mnoha zemích se z tohoto důvodu ukládání BRO nebo potravinového odpadu postupně zakazuje (Kolstad et al., 2012). Jinou možností je naopak jímání skládkového plynu za účelem jeho spálení a výroby elektrické energie či tepla. I tato technologie na některých skládkách (především S-OO3) funguje (Bolan et al., 2013).

Na skládkách panují různorodé podmínky v závislosti na jejich geografické poloze, typu a stáří uloženého odpadu či způsobu provozu (Kolstad et al., 2012). Chování bioplastů tak může být velmi variabilní, k čemuž přispívá i fakt, že jejich vlastní složení je typově heterogenní (Ishigaki et al., 2004). Toto téma není příliš dobře prozkoumáno. Většina studií se soustředí na testování v laboratorních podmínkách, které je obtížné srovnat s malým počtem výsledků ze skutečných skládek (Adamcová & Vaverková, 2016).

Jeden z pokusů, simulující skutečné podmínky v anaerobních reaktorech, došel k několika závěrům: 390 dní při teplotě 21 °C a následně 170 dní při 35 °C nevyvolalo v testovaných výrobcích z PLA žádné změny. V období s vyšší teplotou se sice objevily sotva znatelné známky degradace, ale produkce metanu byla naprosto minimální. Při nižší teplotě pak statisticky zanedbatelná. Takové chování je přičítáno především velmi pomalé hydrolyze, která

by měla snížit molekulovou hmotnost polymeru. Následující činnost bakterií (na skládce je jich omezená diverzita i množství) tak nemohla být příliš účinná. Matematické odhady času, který by byl třeba k 100 % biodegradaci při 21 °C, došly k číslu 100 a více let (Kolstad et al., 2012). Fakt, že se bioplasty po uložení nechovají o moc rozdílně než tradiční polymery, podporuje i výzkum na jedné skutečné skládce typu S-OO3 nedaleko města Plzeň v ČR (Adamcová & Vaverková, 2016). Po dobu 9 měsíců zde byly zakopány 4 odnosné tašky z biodegradabilních plastů. Dvě z nich obsahovaly aditiva k podpoře degradace a 2 byly označené jako kompostovatelné (na bázi škrobu). Po vyjmutí z tělesa skládky nevykazovaly absolutně žádnou změnu, dokonce ani barevný potisk nejevil známky „blednutí“ (Adamcová & Vaverková, 2014). Všechny byly vráceny zpět na původní místo a celý proces se opakoval po dalších 27 měsících (celkově tedy 3 roky). Povrch kompostovatelných plastů už byl po této době viditelně perforován, nicméně tašky stále dobře držely tvar. Lepší představu nabízejí fotografie v obrázku 5. Z výrobků s aditivou pouze zmizela barva potisku (Adamcová & Vaverková, 2016). Další laboratorní pokusy dosáhly lepších výsledků s PHA. Podařilo se je degradovat ze 78 % za 6 měsíců (Shin et al., 1997). Poměrně „rychlý“ rozklad těchto polymerů potvrdila i studie, při které po 4 měsících stejný materiál fragmentoval a výrazně zmenšil svou molekulovou hmotnost. Společně testované biodegradabilní plasty na bázi škrobu se však po této době nijak nezměnily (Ishigaki et al., 2004). Stejně špatně zřejmě na skládce degraduje i PCL. V uměle nastavených podmínkách se začíná viditelně rozkládat až po 500 dnech (Federle et al., 2002).



**Obr. 7:** Bioplasty na bázi škrobu se po třech letech na skládce téměř nezměnily. Na levé straně jsou fotografie před započítáním experimentu, na pravé pak po jeho skončení (Adamcová & Vaverková, 2016).

## 6.3 Nakládání s bioplastovým odpadem

Jak tedy s takovým novým typem odpadu nejlépe naložit? Předtím než budou diskutovány jednotlivé možnosti, je vhodné připomenout několik faktů. Spektrum používaných bioplastových výrobků je v současné době velmi široké (okolo 300 variant). Jednotlivé typy se liší svým složením, vlastnostmi a chováním v koncových zařízeních. To evidentně odporuje jednotnému způsobu nakládání s nimi po skončení životnosti (Krása, 2016). Některé z nich jsou dobře biodegradabilní, ale mají špatné užitné vlastnosti. K jiným se z tohoto důvodu přidává příměs fosilního polymeru, který pevnost či odolnost konečného produktu zlepšuje (Soroudi & Jakubowicz, 2013). A právě druhé zmíněné zaujímají mezi komerčními bioplasty většinový podíl. Mluvíme zde o jakémsi kompromisu mezi biodegradabilitou a odolností/dlouhověkovostí polymerní struktury (Ishigaki et al., 2004). Bioplasty tak jako celek ztrácejí svou vlastnost, která byla také příčinou jejich vzniku – biodegradabilitu. Stávají se nepoužitelné v kompostárnách či bioplynových stanicích, protože se nerozkládají úplně, a rovněž s nimi nelze počítat v recyklačních linkách tradičních plastů, protože částečně degradují. Z hlediska odpadového hospodářství je takový koncept nejhorší možnou variantou (Soroudi & Jakubowicz, 2013).

Podíl bioplastů na trhu je příliš malý, jejich oddělený sběr tak prozatím nemá ekonomické ani praktické opodstatnění (Müller et al., 2014). Úspěšně se zatím uplatňuje pouze na hromadných akcích, jak tomu bylo např. na letních olympijských hrách 2012 v Londýně (Vörös, 2013). Nabízí se proto otázka, jak s biopolymery v rámci sběru zacházet za běžných situací. Mohou být shromažďovány s ostatními (především obalovými) materiály v rámci tříděného sběru. Pak se budou objevovat i v zařízeních, které je zpracovávají (recyklační linky, kompostárny, bioplynové stanice, případně ZEVO nebo skládky). Druhou možností je odkládat je do směsného komunálního odpadu, s nímž budou putovat k energetickému využití v ZEVO nebo skládkování. Poslední alternativa zahrnuje striktní třídění s bioodpady a opět kompostování či výrobu bioplynu. Jako nerozložené zbytky by však touto cestou mohly být bioplasty odstraňovány na skládku (Müller et al., 2014). Ať tak či tak, bude jim vždy věnována zvýšená pozornost, což bude zřejmě obnášet i větší finanční náklady (Cornell, 2007).

Systém nakládání s odpady je v každém členském státě EU jinak (více či méně) rozvinutý. I to je faktor, který problematiku výrazně ovlivní, jednotlivé země se budou s bioplasty vyrovnávat „po svém“ (Philp et al., 2013).

### 6.3.1 Recyklování s konvenčními plasty

Na dotřídňovací linku mohou biopolymery dorazit ve směsi s tradičními plasty zejména pod katalogovými čísly 15 01 02 a 20 01 39. Pokud mají stejné chemické složení, lze je připravit



pro recyklaci stejně jako plasty tradiční. Takový případ je však v současné době znám pouze jeden, a to již zmíněná láhev z bio-PET (Krása, 2016). Ostatní bioplasty se zdají být silně nevyhovující, protože kontaminují vyráběnou surovinu. Její cena a konkurenceschopnost je pak znatelně nižší (Cornell, 2007). Je nutné je tedy ze směsi vytržít. Nejvíce využívanou manuální separaci ale komplikuje fakt, že bioplasty vypadají naprosto stejně jako plasty konvenční (Müller et al., 2014). Pro úspěšné odstranění by tak bylo nezbytné udržovat na pracovišti aktualizovaný seznam výrobků (nejlépe s typovými vzorky), které mají být z linky vyjmuty a důkladně za tímto účelem školit pracující personál (Krása, 2016). Musíme si však uvědomit, že na dotřídřovacím pásu projde asi 1 tuna materiálu za hodinu (jedná se např. o zhruba 30 000 lahví). Při takové rychlosti obvykle není čas na detailnější zkoumání jednotlivých výrobků (Šťastná, 2016). Z dostupných technologií nepřichází v úvahu ani flotační separace, vysoký potenciál má snad jen NIR metoda. Ta je ale spojena s vysokou počáteční investicí. Automatická zařízení s kapacitou jedné tuny za hodinu stojí okolo 150 000 eur (více než 4 mil. korun), některé zdroje dokonce udávají částku 200 000 dolarů (téměř 5 mil. korun) (Šťastná, 2016, Müller et al., 2014) Tyto stroje mají navíc náročnou a drahou údržbu a nepracují na 100 %, výstupní materiál je tak ještě nutné kontrolovat manuálně (Šťastná, 2016).

Snížení ceny a poptávky po kontaminované surovině může ohrozit celý vybudovaný systém recyklace plastů v ČR. Biopolymery tak mohou v důsledku negativně ovlivnit i plnění recyklačních cílů, ke kterým se ČR v rámci EU zavázala (Krása, 2016). Poptávka po recyklovaném materiálu přitom dle žádoucích trendů roste, jen samotná recyklace je díky novým a nestandardním obalům stále náročnější technicky i finančně (Šťastná, 2016).

### **6.3.2 Kompostování**

Zařízení fungující na principu biodegradace trpí úplně opačným problémem než recyklační linky fosilních plastů. Zde je naopak žádoucí, aby se přijímaný odpad rozkládal zcela a beze zbytků, čím větší podíl konvenčního polymeru výrobek obsahuje, tím hůře je zde využitelný. Kompostování bioplastů na bázi PHA, PLA nebo škrobu se zdá být bez problémů (Krása, 2016). Naopak degradace bioplastů s ropnou složkou ústí ve fragmentaci materiálů, biodegradabilní část je rozložena, fosilní nikoliv (Sudesh & Iwata, 2008). Stejně se chovají plasty s přidanými aditivami (podpora rozkladu) – pouze se rozpadají na menší části (Philp et al., 2013).

Průměrná produkce odděleně sbíraného BRO v obcích, kde je tento sběr zaveden, představuje ročně 50-150 kg na obyvatele. Bioplasty by mohly být součástí tohoto odpadu (v katalogu pod 20 02 01) jako sáčky či pytle doporučené pro shromažďování BRO

v domácnostech. Právě takto by se mohly snadno dostat do kompostáren či bioplynových stanic. Další cestou je použití biodegradabilních plastů ve stravovnách či stáncích rychlého občerstvení (tácky, kelímky, příbory, ...). Jejich zaměstnanci by mohly bioplasty odkládat současně s potravinovými zbytky, odpad by následně prošel hygienizací a putoval stejným směrem. Podmínkou je samozřejmě využití jen skutečně rozložitelných bioplastů a také poučení personálu, aby nebyly omylem přimíchávány i plasty fosilní (Krása, 2016).

Likvidování biodegradabilních plastů v domácím kompostování pravděpodobně není nejlepším řešením. Nelze zde nijak nastavit optimální podmínky pro degradaci, ta tak bude velmi pomalá (pokud k ní vůbec dojde) (Emadian et al., 2016). Podobně je tomu i v případě komunitních kompostáren. Ty navíc nejsou dle zákona o odpadech definovány jako technologie nakládání s odpady, jedná se o předcházení jejich vzniku. Žádné bioplasty, typicky např. z litteringu, by zde tak neměly skončit (Krása, 2016). Pouze průmyslové kompostování se v tomto ohledu jeví jako správná alternativa. Jsou-li biopolymery skutečně kompostovatelné (dle informací výrobce), vhodně regulovaná teplota, vlhkost či obsah mikroorganismů vyústí v jejich biodegradaci (Müller et al., 2014). Platí to především pro uzavřené fermentory, deklarované podmínky rozkladu lze totiž v běžnějších pásových hromadách dosáhnout jen těžce. Kromě toho je žádoucí bioplasty před zpracováním roztrždit na jednotlivé typy a drtit na menší kousky, což by v reálu znamenalo většinu kompostáren dovybavit speciální technikou. Při experimentech se totiž stávalo, že se celé tašky a sáčky namotávaly v průběhu aerace na lopatky překopávače (Lipavský et al., 2016). Konečné zpracování kompostu na výstupní produkt zahrnuje prosívání a odstranění veškerých příměsí. Tento výmět se stává odpadem jako nekompostovatelný podíl odpadů živočišného a rostlinného původu (19 05 02). Jeho objem se bude zřejmě zvyšovat, pokud budou zpracovávány bioplasty. Případně může vznikat kompost nevyhovující jakosti (19 05 03), i s tím je nutno nakládat specifickým způsobem (Krása, 2016).

Využití biodegradabilních plastů v kompostárnách tak bude zřejmě limitováno jen na úzký okruh výrobků, tak jak se to osvědčilo např. v San Franciscu v USA. Zdejší kompostovací zařízení akceptují potravinový odpad shromážděný v jednom konkrétním typu pytle (certifikovaný jako kompostovatelný) bez větších problémů. Podobný případ je znám také z amerického státu Massachusetts. Vznikl zde program Massachusetts Supermarket Organic Recycling Network, který zajišťuje zpracování BRO ze supermarketů. Pro shromáždění a transport nespotřebované zeleniny, ovoce či papíru se zde využívá jeden druh biodegradabilního plastu (opět jako pytel) (Kale et al., 2007).



**Obr. 8:** Kompostování v pásových hromadách se potýká se specifickým problémem. Nerozkládající se bioplasty se namotávají na rotující části překopávače (Lipavský et al., 2016).

### 6.3.3 Anaerobní digesce

Likvidace biodegradabilních plastů v bioplynových stanicích má v mnoha ohledech stejné nebo podobné rezervy jako kompostování. Rozklad konkrétního bioplastu závisí na jeho typu a nastavených podmínkách. V anaerobním prostředí je pak zřejmě pomalejší než v aerobním (Ishigaki et al., 2004). Proto je důležité, aby se do odpadu směřujícího do bioplynové stanice, dostávaly jen bioplasty certifikované na tuto variantu rozkladu. Jejich plošné zpracování bude mít stejně malý úspěch jako v případě kompostování (čisté bioplasty se rozkládat budou, směsi špatně) (Krása, 2016). Vedle negativního vlivu na samotnou technologii by mohly mít stanice i problémy ekonomické (což platí i pro kompostárny). Projekty na sběr a využití bioodpadů byly totiž z velké části financovány z operačního programu Životní prostředí. Pokud zařízení neplní nastavená kritéria, je příjemce podpory povinen vrátit dotační prostředky. To by mohlo dopadnout zejména na obce nebo firmy vlastněné obcemi. Proto, zhorší-li se kvalita sbíraného BRO, lze očekávat zvýšení ceny za danou službu či rovnou odmítnutí odběru odpadů (Krása, 2016).

V porovnání s ostatními koncovými zařízeními bývá ale anaerobní digesce představována jako nejlepší možnost z hlediska LCA (life cycle assesment – posouzení životního cyklu). Zpracování bioplastů touto technologií je environmentálně výhodné. Navíc obsahuje významný benefit – výrobu energeticky zhodnotitelného bioplynu (Rossi et al., 2015).

### **6.3.4 Spalování**

Spalování za účelem výroby elektrické energie se dnes uplatňuje (mimo spalování komunálního odpadu) zejména je-li jinak recyklovatelný odpad nějak znečištěn, špatně vytríděn nebo je ho zkrátka málo na to, aby byl recyklován samostatně. Všechna tato kritéria bioplasty splňují/mohou splnit (Vörös, 2013). Jedná se o poslední možnost využití, pokud není jiné nakládání vhodné (Soroudi & Jakubowicz, 2013). Spálení je tak univerzální proces, že jakkoliv odlišné vlastnosti bioplastů ničemu nebrání, spíše naopak (Krása, 2016). Je zhodnocen jejich energetický potenciál a stejně jako jiné odpady tak nemusí skončit na skládce (Müller et al., 2014).

### **6.3.5 Skládkování**

Ani při skládkování nejsou biodegradabilní plasty na překážku. Uložení odpadu už nijak nepracuje s jeho vlastnostmi, naopak spíše doufá v jeho nečinnost. Pokud by se ale bioplasty na skládce rozložily, mohly by zvýšit produkci methanu (Krása, 2016). A ten některé skládky jímají a spalováním z něj vyrábějí energii (Kolstad et al., 2012). Z dostupných studií však vyplývá že, aby se tak stalo, musely by být bioplasty před uložením zpracovány (drcení, ...). Případně by na skládce muselo probíhat pravidelné překopávání, aby se jejich rozklad urychlil a došlo alespoň k celkovému zmenšení objemu skládky (Ishigaki et al., 2004). Ukládání odpadu ale obecně představuje neperspektivní technologii. Zařízeních, které by metan zpracovávaly, mnoho není (Kijchavengkul & Auras, 2008). Skládkování patří na samé dno hierarchie nakládání s odpady, předpokládá se jeho postupný zákaz (Vörös, 2013).

## **7 Budoucnost bioplastů v odpadovém hospodářství**

Zdá se tedy, že aplikace biodegradabilních plastů systému nakládání s odpady příliš užítku nepřináší. Naopak, jedná se o materiály, na které prozatím není připraven (Müller et al., 2014). V následujících kapitolách jsou shrnuta možná řešení, která by tento status mohla zvrátit. Rovněž jsou nastíněny potenciální směry, jimiž by se mohl ubírat budoucí vývoj.

### **7.1 Návrhy řešení**

Materiály vyrobené z přírodních zdrojů jsou v současné době pozitivně přijímány spotřebiteli. Často bývají dokonce upřednostňovány jako ekologicky šetrnější (např. papírové či textilní odnošné tašky vs. plastové). Nakládání s nimi, když se stanou odpadem, ale bývá o něco složitější, což u bioplastů evidentně platí také. Je tedy nezbytné detailně a intenzivně vzdělávat

veřejnost, jak se správně takových materiálů zbavit, až doslouží (Müller et al., 2014). Doporučit jí kam výrobky z nich odložit v rámci nakládání s odpady v konkrétní lokalitě (s ohledem na místní nejvhodnější technologie zpracování). To je první a možná hlavní věc, kterou bude třeba v souvislosti s biopolymery učinit. Chceme-li zabránit, aby je lidé zanechávali ležet v přírodě s vědomím, že se bez problémů rozloží (Krása, 2016).

Z hlediska odpadového řešení je na bioplasty často nahlíženo negativně v porovnání s jinými materiály. Odpadní toky a zařízení dlouho používaných surovin se ale optimalizovaly po desetiletí, což se o „mladých“ výrobcích z bioplastů říci nedá. Zřejmě bude třeba ještě nějaký čas, aby se s nimi odpadové hospodářství úspěšně vyrovnalo (Müller et al., 2014). Zatím se ale první názory na jejich budoucnost shodují v několika bodech. Rozhodně by neměly být aplikovány tam, kde se počítá s recyklací plastů. Pokud se ale více rozšíří, mohl by jejich odpad platit za samostatnou zpracovatelnou surovinu. Současní zpracovatelé a výrobci plastů by je mohli ve svých závodech používat jako jakousi přidruženou výrobu, bylo-li by to v souladu se současnými technickými postupy (viz následující kapitola). Každopádně by asi bylo nejlepší oddělit odpadní tok bioplastů od všech ostatních toků (Cornell, 2007). Ideálně k tomu využít separovaný sběr (případně je odkládat do smíšeného komunálního odpadu) (Krása, 2016).

Aby se efektivní používání biodegradabilních plastů maximalizovalo, zdá se nezbytné zavést jednotný a povinný systém jejich značení (Cornell, 2007). To znamená certifikovat jednotlivé výrobky jako garanci rozkladu v kompostárnách nebo bioplynových stanicích. Zařízení by jinak byla nucena přijímat pouze odpady od dodavatelů, kteří by deklarovali příměs dobře degradovatelných bioplastů (Krása, 2016). V současné době již určitá značení existují, jedná se ale spíše o aktivitu výrobce (obrázek 7). Některé názory jdou ještě dál a požadují certifikaci na konkrétní typ kompostování, z důvodu odlišných podmínek v každém z nich (Kale et al., 2007). Celá záležitost ale naráží na problém s nedostatkem akreditovaných laboratoří, které by jednotlivé materiály testovaly a certifikovaly. Podle webu [bpiworld.org](http://bpiworld.org) jich je po celém světě pouze 13.

Další návrhy se zabývají možnostmi kombinovat koncová zařízení pro dosažení efektivní likvidace. Například po anaerobní digesci bioplastů by mohlo následovat jejich kompostování (Rossi et al., 2015). Došlo by ke zredukování pevných reziduí a obohacení kompostu (Vasmara & Marchetti, 2016).

Ať už bude otázka nakládání s biodegradabilními plasty vyřešena jakýmkoliv způsobem, bude to vždy spojeno s nemalými finančními náklady. Jejich vlastnosti zkrátka brání tomu, aby byly do běžných systémů třídění a zpracování zakomponovány bez dalších zvláštních opatření (Krása, 2016).



**Obr. 9:** Některá současně používaná označení pro kompostovatelné plasty (Kale et al., 2007).

## 7.2 Vlastní (oddělená) recyklace

Biodegradabilní plasty jsou na celosvětovém trhu stále novinkou. Systém a způsob jejich recyklace je spíše ve stadiu teorie než praxe. Přesto není od věci zhodnotit jejich vlastní recyklační potenciál (Soroudi & Jakubowicz, 2013).

Mechanická recyklace polymerů je spojena s několika degradačními mechanismy, které snižují kvalitu druhotného materiálu. Tavení suroviny za vysokých teplot způsobuje tepelný rozklad. Absorbovaná energie je vyšší než disociační energie vazeb mezi monomery, a tak dochází ke štěpení polymerních řetězců a poklesu molekulové hmotnosti. V praxi to znamená, že se zhoršují celkové mechanické vlastnosti výrobku (Yin et al., 2015). Druhým významným procesem je hydrolyza. K té jsou náchylné zejména polykondenzáty, protože obsahují polární hydrolyzovatelnou skupinu (esterová, amidová, nitrilová). Při zpracování nebo už i během života plasty působí voda či vzdušná vlhkost jako rozkladný faktor polymerní struktury. Některé plasty jsou z tohoto důvodu před recyklací předsoušeny (zejména PET) (Gouissem et al., 2014). Mezi další činitele, kteří způsobují nevratné stárnutí plasty, řadíme ještě UV záření, oxidující látky (zejména  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$  a další) nebo chemické kontaminanty setkávající se s materiálem při recyklaci (Soroudi & Jakubowicz, 2013). Degradace probíhá už i během užívání, plasty jsou jako obaly často v kontaktu s vlhkými potravinami nebo kapalinami (Lorenzo et al., 2016).

Z výše uvedených důvodů se při výrobě produktu přidává ke stávajícímu recyklátu vždy ještě určité procento nového čistého polymeru, aby byly kompenzovány degradované vlastnosti (Karahaliou & Tarantili, 2009). Používanou alternativou je i přimíchání tzv. kompatibilizantů (opět surfaktanty), které materiál celkově zpevňují. Uplatnění nacházejí i v recyklaci směsného polymerního odpadu, převážně pro úspěšné spojení PE a PP (Yin et al., 2015).

Biopolymery mají pochopitelně větší sklon k stárnutí v průběhu života a recyklace. Většina z nich jsou dobře hydrolyzovatelné polykondenzáty a i míra tepelné degradace je vysoká (Åkesson et al., 2016). Se vzrůstajícím počtem recyklačních cyklů u nich dochází k výraznému zvýšení elasticity, křehkosti nebo úrovně krystalizace (materiál během procesu samovolně krystalizuje a přestává být čirý) (Lopez et al., 2012). Také molekulová hmotnost klesá během procesu mnohem rychleji než u tradičních plastů (Soroudi & Jakubowicz, 2013). Vlivem vysoké teploty navíc biopolymery viditelně mění barvu – žloutnou (Hopmann et al., 2015). Experimenty prokázaly, že čistá 100 % PLA je nepoužitelná pro další produkci už po jednom recyklačním cyklu. Jiné 100 % bioplasty na tom nebyly o moc lépe, vydržely vždy jen několik cyklů (Yarahmadi et al., 2016). Vysoký přídavek nového polymeru je proto naprosto nezbytný. 70 % příměs nové PLA prodloužila schopnost recyklace na 6 cyklů (Åkesson et al., 2016). Lepších výsledků dosahují biodegradabilní plasty v kopolymeru se syntetickými polymery. Například kopolymer PLA/PS v poměru 1:1 vykazuje poškození až po čtyřech cyklech. Úspěšnou recyklaci kopolymeru PHBV (PHB + BV) je možné dokonce opakovat více než 5 krát (Soroudi & Jakubowicz, 2013). K podobným závěrům dospěly i studie zkoumající recyklaci směsí PLA a PE (Yarahmadi et al., 2016).

V porovnání s konvenčními plasty se však stále jedná o nízká čísla. Například recyklace PE (kterého by mohly bioplasty nahradit) totiž může být opakována až 50krát, aniž by došlo k významné degradaci (Yin et al., 2015). U ostatních plastů vznikajících polykondenzací je počet cyklů bez přidání nového polymerů nižší, nicméně stále vyšší než u biopolymerů (Lettieri & Baeyens, 2009).

Chemická recyklace bioplastů poskytuje kvalitní surový materiál pro jakoukoliv další aplikaci. Pro rozklad na monomery se využívá mechanismů u mechanické recyklace nežádoucích, především působení vody, někdy v kombinaci s tepelným rozkladem. Hydrolyza není příliš náročná ekonomicky ani energeticky, celý proces je rozhodně výhodnější než výroba polymeru z rostlinného zdroje, jehož kvalita je srovnatelná (Piemonte et al., 2013). Laboratorně byla rovněž vyvinuta metoda recyklace směsí PLA a PE založená na rozdílné rozpustnosti v toluenu (Tsuneizumi et al., 2010).

Pokud se v budoucnu biodegradabilní plasty více rozšíří, tlak na jejich recyklování bude jistě značný. Stávajícími technickými postupy to ale zřejmě nebude možné, nebo bude velmi

nevýhodné (Yarahmadi et al., 2016). I přesto že v porovnání s ostatními způsoby likvidace bioplastového odpadu je mechanická recyklace nejvýhodnější z hlediska LCA, perspektivní technologii představuje jen recyklace chemická (Rossi et al., 2015). Rovněž se objevují návrhy využít přírodní podstaty těchto materiálů k biologické recyklaci. V laboratoři byla např. prokázána schopnost houby *Rhizopus oryzae* rozkládat termoplastický škrob na monomery kyseliny mléčné. Ty by tak mohly být využity k další polymeraci na PLA (Accinelli et al., 2012).

### 7.3 Optimální použití

Současně nejdiskutovanější možnost použití biodegradabilních plastů jsou obaly. Např. vlastnosti PLA se zdají být natolik kvalitní, že s ní je možné počítat jako se substituentem PP nebo PS v této oblasti (Storz & Vorlop, 2013). Další návrhy se týkají zemědělství. Bioplasty by se mohly uplatnit jako mulčovací fólie, které se po sklizni plodin zaorají. Pokud by nedošlo k účinnému rozkladu v půdě, mohly by být zlikvidovány kompostováním. V úvahu tak připadají škrobové polymery, PLA nebo PHA, které jsou spolehlivě biodegradabilní (Lipavský et al., 2016). S těmi počítá i prozatím nepřilíš prozkoumaná aplikace ve zdravotnictví. Mohly by být vkládány do lidského těla jako různé oporné implantáty. Po určitém čase by se samovolně rozložily a eliminovaly tak nutnost operativního vyjmutí (Kale et al., 2007). Opačné chování je žádoucí při používání bioplastů v elektronice či automobilovém průmyslu. Zde jsou k nim přimíchávány fosilní plasty, aby byla zajištěna větší pevnost a tak delší životnost (Storz & Vorlop, 2013). Z hlediska nakládání s odpady je nejvýhodnější aplikace ve výrobcích na jedno použití, kde nejsou nároky na mechanické vlastnosti tak vysoké. Což zahrnuje právě využití dobře rozložitelných bioplastů – PLA, PHA a TPS. Ty se ale zase neuplatní tam, kde má být konečný produkt hodně odolný (minimálně ne v čisté degradabilní formě) (Gómez et al., 2014). Např. samotný termoplastický škrob je pro takové aplikace příliš hydrofilní, stále častěji je proto smícháván s konvenčními plasty. Podobně funguje PHB, jehož vlastnosti jsou zlepšovány kopolymerací s hydroxy-valerátem (HV) do PHBV (Guo et al., 2011).

Největší pozornost se stále soustředí na obalové aplikace. I přesto, že jsou na počátku rozvoje, možná se jednou dočkáme jejich masového zavádění do praxe (Müller et al., 2014). Prozatím bylo zjištěno, že největší potenciál nahradit tradiční plasty zde mají PHA. V porovnání s PLA vynikají bariérovými vlastnostmi, jsou méně propustné pro vzduch nebo vodu (Corre et al., 2012). Obaly jsou velmi často organicky znečištěny (zbytky jídel, zeminy, ...), což dělá jejich recyklaci složitější. Mnohdy rovnou končí na skládce. Využití dobře degradabilní bioplasty se jeví jako skvělá příležitost tento odpadní tok přesměrovat do kompostáren či bioplynových stanic (Kolstad et al., 2012). Situace by se dala rovněž vylepšit v případech, kdy je obtížné



nakládat s vícevrstevnými obaly. Ty jsou typicky složeny z papíru (lepenky), plastu a hliníku. Výměnou posledních dvou za bioplast by se bariérové vlastnosti zřejmě nijak nezměnily a celý obal by se stal kompostovatelným/využitelným v bioplynové stanici. Výzkum by se tedy měl zaměřit právě na takové kombinace (Müller et al., 2014).

Bioplasty jsou stále drahé a náročné na výrobu, což jejich rozvoj zatím brzdí (vůbec nejdražší je vyrobít PHA) (Storz & Vorlop, 2013). Aby na trhu uspěly, musí mít nižší cenu. Spotřebitelé totiž přijímají obnovitelné výrobky kladně, ale často je odrazuje právě vyšší cena (Kijchavengkul & Auras, 2008). Většímu rozšíření by mohly napomocť i zákazy používání konvenčních plastů, tak jak se stalo v Itálii. Zákaz plastových odnosných tašek vyústil v jejich náhradu za bioplastové (Accinelli et al., 2012).

## 8 Závěry

Z dostupné literatury vyplývá, že systém nakládání s odpady se s bioplasty nedokáže účinně vyrovnat. Až na jedinou výjimku (bio-PET) je nelze společně recyklovat s plasty konvenčními. Jako velmi problematické se jeví i jejich vytřídění ze směsného polymerního odpadu. Na recyklačních linkách je nežádoucí jakýkoliv jiný materiál než plast. Z hlediska přijímaných odpadů je to tak maximálně specializované koncové zařízení, mnohem širší spektrum substrátů putuje do kompostáren či bioplynových stanic, opačný extrém pak tvoří ZEVO nebo skládky.

V současné době existuje okolo 300 typů biodegradabilních plastů, které se liší zejména složením. Často jsou to směsi přírodních a fosilních polymerů. To vylučuje jejich likvidaci v zařízeních s biodegradabilním principem – bioplynových stanicích a kompostárnách. Jsou-li bioplastové produkty vyrobeny čistě z přírodního materiálu, lze je tímto způsobem zpracovávat bez problémů. To se zřejmě týká pouze výrobků na bázi PLA, PHA nebo termoplastického škrobu, plošné směřování bioplastového odpadu do biodegradačních zařízení by mohlo mít velmi negativní důsledky (praktické i ekonomické).

Jako nejlepší se ukazuje možnost spalovat bioplasty v zařízeních na energetické využití odpadu. Jejich vlastnosti zde totiž nejsou na obtíž, naopak svým relativně vysokým energetickým potenciálem přispívají k výrobě elektrické energie.

Posledním způsobem nakládání s odpady je skládkování. I přesto, že ani tady není s bioplasty žádný problém, je jejich likvidace ukládáním nežádoucí. Skládkování představuje postupně zakazovanou technologii.

Vhodnou výrobní koncepci bioplastů komplikuje tzv. greenwashing. Zvyšování podílu obnovitelných surovin ve výrobku je dobrá marketingová strategie jeho prodeje. Spotřebitelé jsou často mateni tvrzením, že daný produkt je rozložitelný v přírodě (vzniká tak nebezpečí litteringu). Z hlediska odpadového hospodářství je ale lepší, aby byl odpad úplně fosilního původu nebo úplně biodegradabilní. To je i doporučení pro budoucí vývoj – vyrábět skutečně rozložitelné bioplasty za účelem jejich biodegradace, případně vyrábět bioplasty natolik podobné konvenčním plastům, aby se mohly společně recyklovat. Nezmění-li se složení bioplastů, bude se muset přizpůsobit systém nakládání s odpady. Pomoci by mohlo povinné značení výrobků a vzdělávání veřejnosti, jak s nimi správně naložit po skončení životnosti (je ale otázkou, jak moc to bude účinné).

Pokud se více rozšíří, bude se zajisté uvažovat o jejich separátním sběru a možné recyklaci. Z důvodu nevhodných materiálových vlastností to ale nepůjde mechanickou cestou (nebo to bude značně nevýhodné). Perspektivní recyklací je pouze ta chemická.

Slibnou aplikací jsou obaly. Zejména bioplasty jako krycí filmy a vrstvy v kombinaci s papírem se zdají být výhodným materiálem. Samozřejmě za předpokladu, že budou spolehlivě

rozložitelné kompostováním nebo anaerobní digescí. Použití by tak mohly nalézt i na hromadných akcích (festivaly, sportovní zápasy, ...) či v jídelnách. Zde by mohly být využity jako nádoby rychlého občerstvení.

Každopádně, chceme-li dostát principům recyklační společnosti, plošná substituce tradičních plastů těmito biologickými obdobami nepřipadá v úvahu.

## 9 Použitá literatura

Accinelli, C. et al., 2012. Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative. *Chemosphere*, 89(2), pp.136–143. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.028>.

Adamcová, D. & Vaverková, M., 2014. Degradation of biodegradable/degradable plastics in municipal solid-waste landfill. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4), pp.1071–1078.

Adamcová, D. & Vaverková, M.D., 2016. New Polymer Behavior Under the Landfill Conditions. *Waste and Biomass Valorization*, 7(6), pp.1459–1467. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-016-9542-0>.

Åkesson, D. et al., 2016. Mechanical Recycling of PLA Filled with a High Level of Cellulose Fibres. *Journal of Polymers and the Environment*, pp.1–11.

Álvarez-Chávez, C.R. et al., 2012. Sustainability of bio-based plastics: General comparative analysis and recommendations for improvement. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), pp.47–56. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.003>.

Arcos-Hernandez, M. V. et al., 2012. Biodegradation in a soil environment of activated sludge derived polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Polymer Degradation and Stability*, 97(11), pp.2301–2312.

Ardisson, G.B. et al., 2014. Biodegradation of plastics in soil and effects on nitrification activity. A laboratory approach. *Frontiers in Microbiology*, 5(DEC), pp.1–7.

Baláš, Marek, Skála Zdeněk a Lisý Martin. Spalovny odpadu – odpad jako palivo. In: *Tzbinfo* [online]. 2014 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/energie-z-odpadu/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>

Bolan, N.S. et al., 2013. Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas. *Bioresource Technology*, 135, pp.578–587. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.135>.

Carné Sánchez, A. & Collinson, S.R., 2011. The selective recycling of mixed plastic waste of polylactic acid and polyethylene terephthalate by control of process conditions. *European Polymer Journal*, 47(10), pp.1970–1976.

Cesetti, M. & Nicolosi, P., 2016. Waste processing: new near infrared technologies for material identification and selection. *Journal of Instrumentation*, 11.

Comani, E. et al., 2015. CHALLENGES AND OPORTUNITIES IN GREEN PLASTICS : AN ASSESSMENT USING THE ELECTRE DECISION-AID METHOD. , 14(3), pp.689–702.

Cornell, D.D., 2007. Biopolymers in the existing postconsumer plastics recycling stream. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(4), pp.295–299.

Corre, Y.M. et al., 2012. Morphology and functional properties of commercial polyhydroxyalkanoates: A comprehensive and comparative study. *Polymer Testing*, 31(2), pp.226–235. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.11.002>.

Cosate, M.F. & Patri, D.A., 2016. Life Cycle Assessment of Poly ( Lactic Acid ) ( PLA ): Comparison Between Chemical Recycling , Mechanical Recycling and Composting. , pp.372–384.

Eerhart, A.J.J.E., Faaij, A.P.C. & Patel, M.K., 2012. Replacing fossil based PET with biobased PEF; process analysis, energy and GHC balance. *Energy & Environmental Science*, (5), pp.6407–6422.

Emadian, S.M., Onay, T.T. & Demirel, B., 2016. Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste Management*, 59, pp.526–536. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>.

Federle, T.W. et al., 2002. Anaerobic biodegradation of aliphatic polyesters: Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyoctanoate) and poly(ε-caprolactone). *Biomacromolecules*, 3(4), pp.813–822.

Geyer, B., Lorenz, G. & Kandelbauer, A., 2016. Recycling of poly(ethylene terephthalate) ??? A review focusing on chemical methods. *Express Polymer Letters*, 10(7), pp.559–586.

Gómez, E.F. et al., 2014. Biodegradability of crude glycerol-based polyurethane foams during composting, anaerobic digestion and soil incubation. *Polymer Degradation and Stability*, 102(1), pp.195–203. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.008>.

Gómez, E.F. & Michel, F.C., 2013. Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), pp.2583–2591. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018>.

Gouisse, L., Douibi, A. & Benachour, D., 2014. The Evolution of Properties of Recycled Poly ( ethylene terephthalate ) as Function of Chain Extenders , the Extrusion Cycle and Heat Treatment 1. , 56(6), pp.844–855.

Guo, M. et al., 2011. Anaerobic digestion of starch-polyvinyl alcohol biopolymer packaging: Biodegradability and environmental impact assessment. *Bioresource Technology*, 102(24), pp.11137–11146. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.061>.

Hopmann, C., Schippers, S. & Christopher, H., 2015. Influence of Recycling of Poly ( lactic acid ) on Packaging Relevant Properties. , 41532, pp.1–6.

Ignatyev, I.A., Thielemans, W. & Vander Beke, B., 2014. Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem*, 7(6), pp.1579–1593.

Ishigaki, T. et al., 2004. The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. *Chemosphere*, 54(3), pp.225–233.

Kale, G. et al., 2007. Compostability of bioplastic packaging materials: An overview. *Macromolecular Bioscience*, 7(3), pp.255–277.

Kale, G., Auras, R. & Singh, S.P., 2006. Degradation of commercial biodegradable packages under real composting and ambient exposure conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 14(3), pp.317–334.

Karahaliou, E. & Tarantili, P.A., 2009. Stability of ABS Compounds Subjected to Repeated Cycles of Extrusion Processing. *Polymer Degradation and Stability*, pp.2269–2275.

Khoramnejadian, S., Zavareh, J.J. & Khoramnejadian, S., 2011. Bio-based plastic a way for reduce municipal solid waste. *Procedia Engineering*, 21, pp.489–495. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2042>.

Kijchavengkul, Thitisilp and Auras, R., 2008. Perspective Compostability of polymers. *Polymer international*, 57(April), pp.793–804. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pi.2098/full>.

Kijchavengkul, T. & Auras, R., 2008. Compostability of polymers. *Polymer International*, 57(6), pp.793–804. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/pi.2420> [Accessed March 6, 2017].

Kolstad, J.J. et al., 2012. Assessment of anaerobic degradation of Ingeo™ polylactides under accelerated landfill conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 97(7), pp.1131–1141.

Kráska, Ondřej. Větší množství bioplastů v odpadech může ohrozit recyklaci. *Odpady*. 2016, (7), 25-28.

Lettieri, P. & Baeyens, J., 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste ( PSW ): A review. *Waste Management*, 29(10), pp.2625–2643. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>.

Lipavský, Jan, Mayerová Markéta a Stehlíková Iva. Kompostování biodegradabilních plastů: pomaleji, než slibují výrobci. *Odpady*. 2016, (7), 29-30.

Lopez, J.P. et al., 2012. Recycling Ability of Biodegradable Matrices and Their Cellulose-Reinforced Composites in a Plastic Recycling Stream. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(1), pp.96–103.

Lorenzo, V., Orden, M.U. De & Martínez-urreaga, J., 2016. Effect of different mechanical recycling processes on the hydrolytic degradation of poly ( L -lactic acid ). , 133.

Mu, R. & Deckwer, W., 2001. Degradation of natural and synthetic polyesters under anaerobic conditions. , 86, pp.113–126.

Müller, G. et al., 2014. End-of-life Solutions for Fibre and Biod-based Packaging Materials in Europe. *Packaging and Technology and Science*, 27(November), pp.1–15. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pts.893/abstract>.

Philp, J.C., Ritchie, R.J. & Guy, K., 2013. Biobased plastics in a bioeconomy. *Trends in Biotechnology*, 31(2), pp.65–67. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.11.009>.

Piemonte, V. & Gironi, F., 2011. Land-Use Change Emissions : How Green Are the Bioplastics ? , 30(4), pp.685–691.

Piemonte, V., Sabatini, S. & Gironi, F., 2013. Chemical Recycling of PLA: A Great Opportunity Towards the Sustainable Development? *Journal of Polymers and the Environment*, 21(3), pp.640–647.

Rossi, V. et al., 2015. Life cycle assessment of end-of-life options for two biodegradable packaging materials: Sound application of the European waste hierarchy. *Journal of Cleaner Production*, 86, pp.132–145. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.049>.

Shah, A.A. et al., 2008. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), pp.246–265.

Shin, P., Kim, M. & Kim, J., 1997. Biodegradability of degradable plastics exposed to anaerobic digested sludge and simulated landfill conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 5(1), pp.33–39. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02763566>.

Soroudi, A. & Jakubowicz, I., 2013. Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review. *European Polymer Journal*, 49(10), pp.2839–2858. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.07.025>.

Storz, H. & Vorlop, K.-D., 2013. Bio-based plastics: status, challenges and trends. *Landbauforschung*, 63(4), pp.321–332.



Sudesh, K. & Iwata, T., 2008. Sustainability of Biobased and Biodegradable Plastics. *Clean Journal*, 36(5–6), pp.433–442.

Šťastná, Jarmila. Recyklace bioplastů z pohledu zpracovatele. *Odpady*. 2016, (7), 31.

Tsuneizumi, Y. et al., 2010. Chemical recycling of poly(lactic acid)-based polymer blends using environmentally benign catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 95(8), pp.1387–1393. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.01.019>.

Unmar, G. & Mohee, R., 2008. Assessing the effect of biodegradable and degradable plastics on the composting of green wastes and compost quality. *Bioresource Technology*, 99(15), pp.6738–6744.

Vaněk, Tomáš, Lipavský Jan a Vrbová Martina. Výzkum říká: Degradovatelné plasty příliš nedegradují. *Odpady*. 2013, **23**(10), 22-23.

Vasmara, C. & Marchetti, R., 2016. BIOGAS PRODUCTION FROM BIODEGRADABLE BIOPLASTICS. , 15(9), pp.2041–2048.

Vaverková, M. et al., 2012. Study of the Biodegradability of Degradable/Biodegradable Plastic Material in a Controlled Composting Environment. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 19(3), pp.347–358. Available at: <http://www.degruyter.com/view/j/eces.2012.19.issue-3/v10216-011-0025-8/v10216-011-0025-8.xml>.

Vörös, František. Bioplasty – nový problém pro odpadáře/ III. In: *Odpady* [online]. 2012 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/bioplasty-novy-problem-pro-odpadare-iii/>

Vörös, František. Bioplasty – nový problém pro odpadáře/ V. In: *Odpady* [online]. 2013 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/bioplasty-novy-problem-pro-odpadare-v/>

Vörös, František. Aktuální údaje o plastech a využití plastového odpadu. In: *Tzbinfo* [online]. 2014 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11996-aktualni-udaje-o-plastech-a-vyuziti-plastovych-odpadu>

Weng, Y.X. et al., 2010. Biodegradation behavior of PHBV films in a pilot-scale composting condition. *Polymer Testing*, 29(5), pp.579–587. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.04.002>.

Yagi, H. et al., 2009. Anaerobic biodegradation tests of poly(lactic acid) and polycaprolactone using new evaluation system for methane fermentation in anaerobic sludge. *Polymer Degradation and Stability*, 94(9), pp.1397–1404. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.05.012>.

Yarahmadi, N., Jakubowicz, I. & Enebro, J., 2016. Polylactic acid and its blends with petroleum-based resins: Effects of reprocessing and recycling on properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(36), pp.1–9.

Yates, M.R. & Barlow, C.Y., 2013. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers - A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, pp.54–66. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.010>.

Yin, S. et al., 2015. Mechanical Reprocessing of Polyolefin Waste : A Review. *Polymer engineering and science*, pp.2899–2909.

Biobased plastics. *European bioplastics* [online]. 2016 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/biobased/>

Biodegradable plastics. *European bioplastics* [online]. 2016 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/biodegradable/>

Bioplastics market data. *European Bioplastics* [online]. 2016 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.european-bioplastics.org/market/>

Plastics - the Facts 2016. *PlasticsEurope* [online]. 2016 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2016-15787.aspx?FoIID=2>

Polybutylene succinate. *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene\\_succinate](https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene_succinate)

Testing Labs for Compostability. *BPI* [online]. 2015 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z:  
<http://www.bpiworld.org/certified-compostability-testing-laboratories>

Use of plastics. *PlasticsEurope* [online]. 2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z:  
<http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics.aspx>

Vision and mission. *European Biogas Association* [online]. 2013 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z:  
<http://european-biogas.eu/about-us/vision-mission/>

Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady). In: Sbíрка zákonů. 1. 1. 2017.

Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: Sbíрка zákonů. 1. 1. 2017

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: Sbíрка zákonů. 1. 1. 2017