

Výzvy pro nastavení odpadního toku bioplastů

Roman KOVÁŘ^a, Vladimír KOČÍ^{a,b}

^a České vysoké učení technické v Praze, Fakulta architektury, Thákurova 9, 166 34 Praha 6 – Dejvice, e-mail: KOVARRO2@fa.cvut.cz

^b Ústav udržitelnosti a produktové ekologie, VŠCHT v Praze, Jankovcova 23, 170 00 Praha 7, e-mail: Vlad.Koci@vscht.cz

Souhrn

Článek je zaměřen na význam bioplastů v různých odvětvích hospodářství a na možnosti a limity s jejich nakládáním na konci jejich životního cyklu. Bioplasty nacházejí uplatnění v biomedicině, zemědělství a dalších odvětvích. V současnosti se však nejčastěji o nich diskutuje ve vztahu k obalovému průmyslu, kde nachází uplatnění cca 53% současné produkce bioplastů. V článku jsou uvedeny výhodné vlastnosti nejčastěji používaných bioplastů, ale zároveň i limity jejich udržitelného používání a současných možností jejich recyklace. Závěr článku přichází s návrhy nastavení odpadního toku plastů a bioplastů, tak aby byla možná efektivní separace, která je klíčovou podmínkou pro jejich recyklaci.

Klíčová slova: biologicky odbouratelné plasty BOP, recyklace, separace, odpadní toky

Úvod

Přesto, že o bioplastech začíná společnost intenzivněji diskutovat až v posledních letech, tak má jejich vývoj za sebou už více než 100 let, neboť se na jejich vývoji začalo pracovat již na konci 19. století. V té době byl poprvé syntetizován biologicky rozložitelný plast s názvem Galalith z mléčného proteinu Caseinu. V roce 1912 to byl celofán, který byl patentován švýcarským chemikem Jacquesem E. Brandenbergerem. V roce 1925 byl poprvé syntetizován bioplast PHB z bakterií. Nejrozšířenější bioplast současnosti PLA byl poprvé syntetizován v roce 1932¹.

Od 70. let dvacátého století se vývoj bioplastů rozjel intenzivněji. V současné době existuje přibližně 300 druhů bioplastů. Avšak velká část aplikací těchto bioplastů je prováděna mnohdy pouze z marketingových důvodů a jde proti podmínkám udržitelného nakládání s plasty a energií. Tím máme na mysli především často zcela nevhodné aplikace v obalovém průmyslu. V roce 2019 se objem produkce bioplastů pohyboval přibližně kolem 0,6 % z celkového objemu vyráběných plastů a každým rokem jeho objem narůstá².

Marketing firem zaměřený na environmentální dopady je asi největším důvodem, proč v současnosti slyšíme čím dál více o bioplastech. Avšak pod pojem bioplasty se řadí doopravdy velká skupina materiálů. Jejich původ, složení i správné využití koncový zákazník neumí téměř rozlišit. Mnohdy si tyto souvislosti neuvědomují ani samotné firmy, které toto zboží často jenom nabízejí koncovým zákazníkům. Z marketingu se pak stává greenwashing. Pokud jde o biologicky odbouratelné plasty (BOP), tak pouze 13 % z nich je vyrobeno výhradně z biomasy, dalších 75 % je složeno ze směsi bioplastů a fosilních plastů a dalších 12 % jsou biologicky odbouratelné fosilní plasty (např. Kopolyester). Nejproblematičtější skupinou je oněch 75 % bio-fosilních směsí obsahujících 50 – 80 % fosilních plastů³.

Termín biologicky odbouratelné plasty BOP je svým názvem zavádějící, protože budí mylný dojem, že se tyto plasty v přírodě snadno rozkládají. Naopak většina z nich se v přírodních podmínkách rozkládá problematicky, a to se týká nejen oněch 75 % bio-fosilních plastů, ale i části produktů vyráběných pouze z biomasy. Takové plasty často nejsou vhodné pro kompostování, ani pro anaerobní digesti (zplynování). Asi nejzásadnějším problémem BOP v současnosti je skutečnost, že v podmínkách odpadového hospodářství komplikují podmínky pro recyklaci fosilních plastů. Problém nastává ve chvíli, kdy se BOP dostane do recyklačního procesu s fosilními plasty. Například nejrozšířenější bioplast v obalovém průmyslu PLA je vizuálními a fyzickými vlastnostmi téměř k nerozeznání od fosilních plastů,

jako je PET, PS nebo PP. Ovšem když se PLA dostane do recyklačního procesu s PET, tak ho nenávratně znehodnotí už při množství 0,1 % z celkového objemu⁴.

To však neznamená, že bioplasty jsou špatné a fosilní plasty dobré. Vždy záleží na tom, jaký materiál, na co a v jakých souvislostech použijeme. Asi nejdůležitější současný poznatek v oblasti BOP je to, že jestli s nimi máme zacházet udržitelně, tak bychom je už vzhledem k jejich finanční náročnosti na výrobu měli recyklovat. Tyto potřeby nám přináší výzvy v otázkách nastavení odpadního toku bioplastů. Záměrem tohoto článku je přiblížit výjimečné vlastnosti nejrozšířenějších bioplastů, upozornit na nutnost jejich recyklace a navrhnout možnosti nastavení jejich odpadního toku, respektive separace.

Důvody pro používání bioplastů

Následující tři důvody nás obvykle vedou k úvahám o používání bioplastů:

1. Úspora fosilních zdrojů
2. Nízké emise skleníkových plynů
3. Méně plastového odpadu

Jak jsou tyto tři důvody oprávněné? O úsporu fosilních zdrojů by se mohlo částečně jednat, ovšem připomeňme si, že výroba veškerých plastů představuje přibližně 5 – 7 % z globální spotřeby ropy v současnosti. Kdybychom chtěli mluvit doopravdy o úsporách fosilních zdrojů, asi bychom se měli zaměřit na jiná odvětví průmyslu, především palivářský a energetický. Navíc v době, kdy ještě na mnoha místech světa jsou problémy s nedostatkem potravin, tak pěstování kukuřice, sóji, nebo cukrové třtiny za účelem výroby bioplastů ve velkém také nedává smysl. Naštěstí však existují výrobní postupy, kdy lze bioplast vyrábět jak ze zemědělského, tak živočišného odpadu a na tyto by se měly výrobci bioplastů zaměřit⁵.

Pokud jde o druhou výhodu bioplastů, tedy snížení emisí skleníkových plynů, tak tam je zajímavý potenciál. Nezapomínejme však, že v případě výroby bioplastů z primárních zemědělských surovin může docházet k uvolňování skleníkových plynů samotnou zemědělskou výrobou související s pěstováním surovin potřebných pro výrobu bioplastů. Dále samotný rozklad BOP může v přírodě, nebo i na skládkách vést k emisím methanu, což je také skleníkový plyn⁶. O zajímavý přístup se v poslední době snaží Berlínský start up „Made of air“, který o svém bioplastu tvrdí, že je zaručeně „carbon negative“. Princip jeho výroby spočívá v tom, že je směsí velkého podílu bio-sazí s bioplastem na bázi cukrové třtiny. Svoje saze nazývají bio-sazemi, protože jsou získávány pyrolýzou zemědělské biomasy, čímž vysvětlují ukládání atmosférického CO₂ do jejich plastu⁷. Ovšem jak velkou uhlíkovou stopu má jejich pyrolýza zemědělské biomasy startup neudává.

Pokud jde o třetí výhodu bioplastů, tedy „méně plastového odpadu“, tak tato výhoda platí pouze u těch BOP, které jsou stoprocentně vyrobeny z biomasy. Pouze u nich můžeme mluvit o toxické a ekotoxické nezávadnosti. Vzhledem k tomu, že výrobci z marketingových důvodů označují za bioplasty veškeré BOP, tak to znamená, že více než 75 % těchto materiálů, které jsou bio-fosilními kompozity, vytváří plastový odpad ve formě mikroplastů, nejsou-li zpracovány energeticky v ZEVO.

Pokud chceme, aby se výše uvedené tři důvody pro použití bioplastů naplnily, tak bychom se při jejich aplikacích měli vyhýbat bio-fosilnímu kompozitnímu složení a v odpadních tocích plastů najít způsoby pro jejich efektivní separaci. Efektivní separace BOP od fosilních plastů je nutná ze dvou důvodů: Za prvé, aby nebyl znehodnocen fosilní plast určený k recyklaci; za druhé proto, aby byla možná recyklace samotného BOP.

Momentálně není pochyb o nutnosti recyklace bioplastů, které nejsou biologicky odbouratelné a svým chemickým složením jsou stejné jako jejich petrochemické protějšky, jako jsou BioPET, BioPE a BioPP. Prozatím však není úplně jasný scénář pro BOP, u nichž se předpokládá biodegradace za jediný možný způsob konce jejich životního cyklu. Vzhledem k nutnosti ochrany primárních zdrojů je třeba nastavit správné nakládání s odpady i z těchto materiálů. V jejich případě by měla být cílem buďto mechanická nebo chemická recyklace. Z důvodů, že termomechanické vlastnosti většiny BOP nejsou příliš vhodné pro mechanickou recyklaci, tak by se průmysl spojený s bioplasty měl soustředit hlavně na recyklaci chemickou.

Klíčový problém, který prozatím brání recyklaci BOP a navíc mnohdy znehodnocuje recyklační snahy i u konvenčních plastů, je jejich nevyřešený odpadní tok. Níže v textu přicházíme se dvěma návrhy, jak tento klíčový problém řešit.

Druhy bioplastů a možnosti jejich využití

Velikost produkce bioplastů (ale i konvenčních plastů) každoročně stoupá. V roce 2019 bylo vyprodukováno 368 milionů tun plastů⁸. Z toho téměř 40 % bylo použito na obaly, přibližně 20 % bylo využito ve stavebnictví. Pokud jde o jednotlivé druhy plastů, tak nejvíce bylo vyrobeno PE (přibližně 30 %) a PP (přibližně 20 %). Vzhledem k růstu produkce bioplastů je třeba počítat s tím, že tu budou BOP koexistovat s fosilními plasty dlouhá desetiletí. Je proto nutné najít nejlepší způsoby konce životního cyklu pro všechny nejpoužívanější plasty a bioplasty.

V roce 2019 byla produkce bioplastů 2,11 milionu tun. To je asi 0,6 % celkové produkce plastů². Vyšší cena BOP než u konvenčních plastů a jejich obecně horší termomechanické vlastnosti jsou důvodem tak nízkého podílu na trhu vůči konvenčním plastům⁹. S používáním bioplastů jsou v současnosti spojeny nemalé problémy, které se projevují především v odpadovém hospodářství. Z toho důvodu bychom měli současný malý podíl bioplastů na trhu paradoxně spíše kvitovat.

Když zprůměrujeme historická čísla týkající se recyklace plastů od dob, kdy je společnost začala využívat, tak je vidět, že je před společností ještě velký kus práce pro nastavení správných procesů pro nakládání s plasty. Čísla nám ukazují, že pouze 9 % plastů, které kdy byly vyrobeny, bylo recyklováno. A z tohoto množství recyklovaných plastů bylo recyklováno pouze 10 % vícekrát než jednou¹⁰. To, že společnost svoje zacházení s plasty poslední roky přehodnocuje, se projevilo tím, že od roku 2006 do roku 2018 se objem recyklovaného plastu zdvojnásobil. Nicméně stále v roce 2018 skončilo 25 % produkce plastu na skládkách⁵. Současné předpoklady naznačují, že v přírodě nebo na skládkách se ocitne do roku 2050 12 miliard tun plastového odpadu. Do roku 2015 takto skončilo přibližně 5 miliard tun. Odhaduje se, že od roku 2010 do roku 2025 skončí v mořích 100 milionů tun plastového odpadu, který tu bude postupně degradovat na mikroplasty¹¹.

Vzhledem k tomu, jak média upozorňují na problémy spojené s používáním konvenčních plastů, tak se zdá právě využívání bioplastů jako slibná alternativa, protože přibližně polovinu z nich tvoří BOP a většina z nich je vyrobena z obnovitelných zdrojů¹². Bohužel, ne všechny příklady využití bioplastů dávají smysl. V současné době i z důvodu, že chybí legislativa na efektivní zacházení z bioplastovým odpadem, tak si dovoluujeme říci, že velká část aplikací, pro které používáme bioplasty, je pro planetu Zemi větší zátěží, než kdyby byla vyrobena z konvenčních plastů. Tento problém se týká především nemalé části aplikací v obalovém průmyslu.

Životní cyklus plastů, nehledě na jejich původ (BIO x Fosilní) nebo jejich degradabilitu, může být udržitelný pouze tehdy, když konec jejich životního cyklu bude zahrnovat smysluplnou recyklaci¹³. Nejpreferovanější způsob recyklace, tedy mechanickou recyklaci společnost poslední roky úspěšně aplikuje na čím dál větším podílu odpadu z konvenčních plastů. Bohužel právě s masivnějším příchodem bioplastů si společnost celou situaci zkomplikovala. Jako zásadní problém můžeme popsat to, že doposud nejsou nastavena globálně pravidla pro efektivní nastavení odpadních toků plastů s bioplasty, na jejichž konci by měly být rozříděné téměř se 100 % efektivitou.

Protože do skupiny bioplastů spadá široká škála materiálů s mnohdy odlišnými termomechanickými vlastnostmi, věnujeme následující text přehledu těch nejpoužívanějších bioplastů a jejich třídění.

Základní rozdělení bioplastů do 3 skupin:

1. Biologicky odbouratelné plasty vyrobené z biologických zdrojů.	2. Biologicky odbouratelné plasty vyrobené z petrochemických zdrojů.	3. Biologicky neodbouratelné nebo jenom částečně odbouratelné plasty s monomery na biologické bázi.
Například PLA, PHA, TPS a PBS. Speciální kategorií biologicky odbouratelných plastů jsou biologicky vstřebatelné s použitím ve zdravotnictví.	Například PBAT a PCL. I tato skupina bioplastů tvoří část biologicky vstřebatelných plastů vhodných pro použití ve zdravotnictví	Mnohdy je u těchto plastů část monomerů na biologické bázi a část monomerů na petrochemické bázi, ty označujeme za heteropolymery. Například BioPE, BioPET, BioPP nebo BioPA.

Syntéza biologicky odbouratelných polymerů může být provedena těmito způsoby:

1. Mechanicko-chemickou modifikací přírodního polymeru, jako například celulózy nebo škrobu.
2. Chemickou syntézou z monomeru vyrobeného biotechnologickou přeměnou obnovitelného zdroje (například PLA z kyseliny mléčné vyrobené fermentací cukru) nebo chemickým zpracováním z fosilních zdrojů (například PVA).
3. Bakteriální syntézou polymerů z mikroorganismů (například PHB).

Nejrozšířenější bioplasty a jejich vlastnosti:

PLA – Nejrozšířenější bioplast současnosti je PLA. Lze ho vyrábět z cukrové třtiny, kukuřice, brambor a tapioky¹⁴. Termomechanické vlastnosti jsou podobné PET, ale je křehčí a neodolává dlouhodobě vlhku. Používá se hlavně v obalových aplikacích na jednorázové kelímky, misky a láhve. Také se používá na hygienické produkty, jednorázové přístroje a mulčovací fólie v zemědělství. Existuje také pěnové PLA, které se používá jako izolace, alternativní k pěnovému polystyrénu¹⁵.

PHAs – Biologicky odbouratelné alifatické polyestery. Lze je vyrábět z glukózy, sacharózy a rostlinných olejů pocházejících ze široké škály surovin¹⁶. Nicméně z důvodu použití jiného udržitelného uhlíku bylo uvažováno i o surovinách jako dřevěná štěpka, výřezy lepenky a odpadní plastové láhve a sáčky¹⁷. Při výrobě PHA se používají bakterie. Ve velkém měřítku výroby to zahrnuje prozatím drahé fermentační, izolační a čistící procesy. Proto se větší využití PHAs očekává, až se tyto procesy zefektivní. Podobně jako PLA, tak i PHAs mají uplatnění u jednorázových obalů, ale i v biomedicině. Experimentuje se s jejich využitím pro výrobu bioabsorbovatelných stehů, obvazů na rány, tkáňových podpor a destiček pro fixaci zlomenin⁹. Na rozdíl od PLA je PHBV (PHAs) podstatně rychleji biodegradovatelné.

Plasty na bázi škrobu – Škrob je druhá nejhojnější organická sloučenina na zemi hned po celulóze. Komerčně dostupný škrob se získává především z pšenice, rýže, kukuřice, brambor a ječmenu. Plasty na bázi škrobu přitahují stále větší zájem, protože se biologicky zcela odbourávají, a to relativně rychle. Termoplastický škrob (TPS) se opět hojně využívá na obalové aplikace, např. vakuované tácky. Využití má i v zemědělství pro mulčovací fólie a květináče. Také se používá pro hygienické a kosmetické výrobky¹⁸.

Plasty na bázi celulózy – Celulóza je nejhojnější organická sloučenina na zemi. Je produkována rostlinami jako strukturální polymer. Celulóza je odolnější vůči hydrolýze díky silnějším vodíkovým vazbám. Stejně jako škrob, tak ani celulóza není termoplastický polymer, a proto musí být výrobně upravována. Biologická odbouratelnost derivátů z celulózy se měří na stupnici (DS) v rozmezí 1-3. Čím je číslo nižší, tím se tyto deriváty rychleji rozkládají¹⁹.

Biologicky odbouratelné plasty z petrochemických zdrojů – Obecně syntetické polymery nejsou biologicky odbouratelné. Jejich rozložitelnost však lze docílit přidáním nestabilní (amidové, etherové nebo esterové) vazby. Potom mohou za jistých podmínek podléhat hydrolýze. Tyto plasty tvoří relativně malou skupinu biologicky odbouratelných plastů na fosilní bázi. Používají se hlavně ve směsi s BOP na biologické bázi pro zlepšení jejich termomechanických vlastností. Nejvýznamnějšími polymery z této skupiny jsou PBS, PCL, PVA a PBAT. **PBS** relativně pomalu degraduje a využívá se pro výrobu fólií na balení potravin, nákupní tašky, zemědělské mulčovací fólie, květináče a hygienické výrobky. **PCL** je semi-krystalický polymer s vysokou houževnatostí. Pomalu degraduje a díky tomu našel uplatnění v biomedicině na aplikacích, které potřebují pomalou bio-vstřebatelnost, jako jsou některé druhy stehů a podpor v tkáňovém inženýrství²⁰. **PVA** je biologicky odbouratelný a bio-kompaktní polymer. Je rozpustný ve vodě, ale zároveň je odolný většině organických rozpouštědel. Používá se na výrobu vícevrstvých obalů díky své schopnosti vytvářet film, který funguje jako skvělá kyslíková bariéra. Využívá se také na úpravu vody, barviv, detergentů a dezinfekčních prostředků. Má využití i v zemědělství. PVA vlákna nacházejí uplatnění v biomedicinské oblasti²¹. **PBAT** je biologicky odbouratelný plast, který má vynikající houževnatost a skvělou odolnost proti lomu. Zvládá vysoké napětí při přetržení, ale má nízkou pevnost v tahu. Vyrábějí se z něho kompostovatelné pytle na

organický odpad, mulčovací fólie do zemědělství, ale i obalové fólie a jednorázové nádoby²². Podobně jako PCL, tak i PBAT se využívá pro zlepšení mechanických vlastností jiných bioplastů, jako jsou PLA a PHAs, ale i pro zlepšení vlastností konvenčních plastů jako je polykarbonát⁶.

Biologicky nedegradovatelné plasty na biologické bázi – Komerčně nejatraktivnější nedegradovatelné bioplasty jsou bio-protějšky nejpoužívanějších fosilních plastů, jako jsou PE, PP a PET. Mnohdy se k jejich výrobě používají jak biologické suroviny, tak i petrochemické suroviny. V tom případě je pak nazýváme heteropolymery. Jejich výhodou je, že mají menší ekologickou stopu ve fázi výroby. **BioPE** je chemicky identický se svým petrochemickým protějškem PE. Díky tomu s ním lze i společně recyklovat. Ve velkém se začal BioPE vyrábět poprvé v roce 2010 brazilskou firmou „Braskem“ a k jeho výrobě se používá především cukrová třtina. V dnešní době je 1 kg BioPE cca o 30% dražší než jeho petrochemický protějšek. Udává se, že ekologická stopa BioPE je podstatně nižší než PE. **BioPP** lze získávat z biologických zdrojů fermentací glukosy a následnými postupy. O masivnější výrobu BioPP se poprvé pokusila také brazilská firma „Braskem“. Výrobní postupy BioPP jsou zatím méně prozkoumané a postup, který používá firma „Braskem“ je stále ještě tajný. Nicméně podle Bioplastics Europe se očekává zvýšení jeho výroby na 6-ti násobek. BioPET a BioPTT patří mezi heteropolymery. To znamená, že pro jejich výrobu jsou použity jak biologické, tak fosilní suroviny. **BioPET** obsahuje přibližně 20 % uhlíku biologického původu a **BioPTT** obsahuje přibližně 27 % biologického uhlíku²³. Od roku 2009 společnost Coca-Cola aplikuje BioPET na část portfolia svých produktů. Přesto, že PET je obecně zařazen mezi nerozložitelné plasty, tak existují enzymy a bakterie, které ho rozložit umí, ovšem velice pomalu²⁴. **BioPA** je vyráběn z kyselin pocházejících z ricinového oleje. Lze ho vyrábět plně nebo částečně z biologických zdrojů. Má vynikající mechanické vlastnosti jako houževnatost, tvrdost a odolnost proti oděru. V roce 2019 tvořil 12 % objemu celosvětové výroby bioplastů.

PAF a PEF, polyestery na bázi 2,5 furandikarboxilátu – Na rozdíl od ostatních nedegradovatelných bioplastů, tyto nemají svůj petrochemický protějšek. Přesto jsou mezi bioplasty považovány za „spícího obra“. **PAF** nabízí slibnou bio-odvozenou alternativu k fosilnímu PAT, zatímco **PEF** nabízí plně bio-odvozenou alternativu k PET²⁵. Oba tyto bioplasty mají uplatnění jak v obalovém, tak i textilním průmyslu, jsou ale vhodné i pro techničtější aplikace s vyšší přidanou hodnotou²⁶.

Možnosti recyklace bioplastů

Skutečně udržitelný cyklus bioplastového odpadu můžeme zajistit pouze tak, že odstraňování jeho odpadu bude zahrnovat recyklaci. Asi všichni se shodují na recyklaci biologicky neobdouratelných bioplastů, protože jejich recyklace je možná společně s jejich petrochemickými protějšky. Avšak existuje mylné přesvědčení, že jediný konec životního cyklu BOP má být jejich kompostování. Přitom většina BOP se velmi špatně rozkládá, dokonce i v kompostárnách, kde k tomu jsou ideální podmínky². **Kompostování** někdy nazýváme také „organická recyklace“. Ve skutečnosti kompostování BOP není vždy ideální způsob recyklace.

Optimálním způsobem je recyklovat BOP tak, aby z nich mohly vzniknout opět bioplastové produkty. To lze zajistit mechanickou (primární, nebo sekundární) recyklací a chemickou (terciární) recyklací. Jako příklad primární mechanické recyklace můžeme uvést výrobu PLA nápojových kelímků technologií vakuování, kdy je odpadní materiál vzniklý ostřihem kelímků využit znovu k výrobě polotovaru (fólie). Z tohoto polotovaru se ty samé kelímky opět vyrábějí. Nutno si uvědomit, že v takovém případě může být poměr recyklátu vůči panenskému PLA relativně malý. Sekundární mechanická recyklace probíhá tak, že recyklát se využívá na méně náročné aplikace, než původní materiál sloužil.

Ačkoli **mechanická recyklace** je nejlevnější způsob recyklace, tak v případě BOP je velmi špatně aplikovatelná. Protože například PLA může být mechanicky recyklováno při přidání 70% panenského PLA pouze šesti cykly⁴. Ostatní BOP na tom nejsou lépe. V poměru s fosilním PE, který může být recyklován až padesáti cykly je zřejmé, že mechanická recyklace v případě BOP není úplně ideální. Proto v případě BOP se jeví perspektivně právě chemická recyklace. Z chemicky recyklovaného bioplastu se zpětně získávají cenné monomery využitelné k opětovné výrobě panenského bioplastu nebo pro výrobu jiných chemikálií. Jak pro sekundární mechanickou, tak pro terciární chemickou recyklaci je nutné umět efektivně rozřadit jednotlivé druhy plastů, což je prozatím kámen úrazu pro

konkurenceschopnost na trhu se sekundárními bioplasty. Navíc celou situaci komplikuje částečné využívání vícevrstvých (kompozitních) materiálů. Separaci jednotlivých druhů bioplastů lze provádět ručně, nebo strojově. Pro strojovou separaci se využívají jak rozdíly v hustotě jednotlivých materiálů, tak optické systémy krátkého infračerveného záření (NIR) nebo rozpouštědla. Zmíněné způsoby však nejsou dostatečně efektivní. Prozatím jediný efektivní způsob separace počítá se zapojením výrobců plastových obalů, kteří by při jejich výrobě používali technologii „Digimarc barcode“, čímž by byl obal po celém povrchu defacto neviditelným způsobem označen a umožnil by přesnou strojovou separaci²⁷.

Chemická (terciární) recyklace – Chemickou recyklací BOP šetříme především primární zdroje, než že bychom se snažili předcházet vzniku odpadu. Nejběžnějším způsobem chemické recyklace jsou různé druhy solvolýzy. **Solvolýza** je technika depolymerizace plastů pomocí rozpouštědel ve spojení s teplem. Mezi způsoby solvolýzy patří hydrolýza, alkoholýza, glykolýza, metanolýza, acidolýza, aminolýza a amonolýza. Zdánlivě tyto druhy recyklace nedávají pro BOP smysl z hlediska možnosti ukončení životního cyklu, ale dávají velký význam z hlediska ekonomického a ekologického. Například získání kyseliny mléčné z PLA odpadu vyžaduje výrazně méně energie než při její výrobě fermentací biomasy. Udává se, že na výrobu 1 kg kyseliny mléčné z biomasy je potřeba 55 MJ, zatímco hydrolýzou z PLA odpadu to je pouze 14 MJ. Jako další zajímavý způsob chemické recyklace se jeví pyrolýza, která umožňuje zpracovat nekvalitní, heterogenní, degradovaný nebo kontaminovaný plastový odpad. Ta se jeví výhodně k již zmíněným problémům se separací jednotlivých druhů bioplastů. **Pyrolýza** je degradace plastového odpadu, díky jeho zahřátí na 300 – 700 °C v bezkyslíkaté atmosféře. Výsledkem pyrolýzy jsou složky ve třech skupenstvích: plynném, tekutém a pevném. Mezi plynné patří hořlavé látky, které lze během pyrolýzy opětovně použít jako zdroj tepla pro samotnou pyrolýzu. Mezi tekuté patří oleje a kondenzované páry. Tato dvě skupenství tvoří 97 – 99 % depolymerizovaného plastu. Zbýlé 1 – 3 % tvoří pevné skupenství „saze“. Pro optimální výsledek pyrolýzy je nutné používat katalyzátory. **Zplyňování BOP** by mohlo být v budoucnu zajímavé například pro získávání vodíku. Je však otázka, nakolik by to bylo zajímavé z pohledu budoucího objemu vodíkové energetiky. Více reálných zkušeností se zplyňováním BOP v současné době nemáme.

Enzymatická a mikrobiální recyklace – Toto je nový druh recyklace bioplastů, který je v raných fázích vývoje a prozatím tvoří nový způsob. Není zařazen do chemické recyklace. Pro tento způsob recyklace se využívá působení enzymů a mikroorganismů k rozkladu BOP na monomery a jiné cenné chemikálie. Tímto způsobem se zásadně liší od kompostování, které je pouhým ukončením životního cyklu BOP. Nevýhodou enzymatické a mikrobiální recyklace je její časová náročnost, která nejde urychlit zvýšením teploty z důvodů možné degradace enzymů².

Poslední možnosti degradace a odstranění bioplastového odpadu

Na rozdíl od předchozích způsobů recyklace je cílem těchto posledních možností pouhé odstranění odpadu. U konvenčních plastů patří mezi tyto možnosti buďto energetické využití nebo skládkování. Avšak BOP mají možnost tzv. „organické recyklace“. Tu lze provádět domácím nebo průmyslovým kompostováním, anaerobní digesí nebo biodegradací v zemědělské půdě. Rozdíl mezi kompostováním a anaerobní digesí je zásadní v tom, že kompostování probíhá za přítomnosti kyslíku a výslednými produkty jsou CO₂, H₂O, teplo, minerály, biomasa a humus. Naproti tomu anaerobní digesce probíhá bez přítomnosti kyslíku a výslednými produkty je bioplyn, biomasa a digestát. Poslední dva produkty lze využít ke hnojení. To, co mají kompostování a anaerobní digesce společného, je, že mohou probíhat buďto za nízkých teplot cca 35 °C nebo v ideálním případě za vyšších teplot 50 – 60 °C, čímž se celý proces urychluje.

Jenže ne všechny BOP jsou kompostovatelné. Pro BOP dává smysl i energetické využití neboli kvartérní recyklace. Přestože energetické využití je v hierarchii nakládání s odpady níže než klasická recyklace, tak je určitě výhodnější než skládkování bioplastového odpadu. Výhrevnost bioplastů je obdobná jako u fosilních plastů²⁸. Navíc v současné době, kdy ještě nejsou vytvořeny efektivní způsoby separace bioplastů, tak většina tohoto odpadu (především obalů) ani lepší, než energetické využití nemá.

Návrhy pro efektivní nastavení odpadního toku plastů a bioplastů

Na úvod této kapitoly si pojdme připomenout, co brání masivnější recyklaci jak konvenčních plastů, tak bioplastů. Důvodem je, že pro efektivní recyklaci potřebujeme v první řadě ekonomicky efektivní separaci jednotlivých druhů plastů blížící se 100% spolehlivosti. Pojdme se v této kapitole společně zamyslet, jestli technologie pro ekonomicky efektivní separaci jednotlivých druhů plastů má již společnost k dispozici.

Jestliže mluvíme o ekonomické efektivitě, tak rovnou můžeme zapomenout na ruční třídění plastů, které se zmiňuje jako jedna z možností. Pokud jde o strojovou separaci, tak v současné době se využívají principy založené na rozdílu hustoty jednotlivých materiálů nebo optické systémy krátkého infračerveného vidění (NIR), rozpouštědla, nebo fluorescenční barviva². Systém NIR vykazuje při separaci PLA od PET až 97,5 % účinnost. Což je nedostatečné vzhledem k tomu, že recyklovaný PET může být znehodnocen PLA už v koncentraci 0,1 %⁴. Navíc systém NIR je i finančně značně nákladný.

V současné době se vkládá hodně nadějí také do systémů založených na konvoluční neuronové síti (CNN), jejichž záměrem je naučit počítač vidět a rozlišovat předměty obdobně jako to umí člověk. Z těchto systémů je nejzmiňovanější algoritmus strojového vidění nazývaný „recycleye“. Nicméně ani tento systém nevykazuje zdaleka 100 % spolehlivost²⁷.

Asi nejnadějnější systém se začíná používat některými evropskými výrobci v rámci projektu „Holy Grail 2.0“, který je založený na tom, že už samotní výrobci označují své plastové obaly technologií „Digimarc Barcode“, která je lidskému oku neviditelná. Tato technologie doopravdy efektivní strojovou separaci jednotlivých plastů, a to za předpokladu, že by byla použita globálně. Navíc jako nadstavba pro tuto technologii existuje mobilní aplikace „Digimarc Mobile SDK“, která umožňuje i koncovému zákazníkovi naskenovat obal a získat veškeré relevantní informace týkající se plastu, z kterého je obal vyroben²⁹. Kdyby byl tento systém používán v rámci projektu Holy Grail 2.0 využít globálně, tak by bylo možné sběr BOP realizovat ve stejných kontejnerech s konvenčními plasty. Tím bychom se vyhnuli nápisům na obalech z BOP, které oznamují „Nevhazovat do plastu“. Nápis je pro většinu koncových zákazníků velmi matoucí, proto toto upozornění mnohdy nerespektují. To celé by mohlo být podpořeno ještě barevným rozlišením BOP a konvenčních plastů, jenom jako bezpečnostní pojistka.

Co se týče barevného rozlišení jako pojistky, mám tím na mysli, že z konvenčních plastů jsou vhodné k recyklaci (mimo downcyklace) pouze plasty bezbarvé čiré nebo bílé. Zatímco většina BOP je vhodná pouze k chemické recyklaci, tudíž při použití správného pigmentu by jim zabarvení nemuselo vadit. To, že v tomto směru chybí ve většině zemí legislativní pravidla, by se mělo změnit. Potom by nevznikaly tak paradoxní situace, jako u jednoho slovenského výrobce minerálních vod (působícího i v Čechách), který má založený marketing na tom, že jeho láhve jsou vyrobeny ze 100% rPET, přičemž tyto láhve jsou barevné, a tudíž k následné opravdové recyklaci bezcenné.

Závěr

Průměr historických čísel týkajících se recyklace plastů je velmi nepříznivý. V posledních letech se to naše společnost snaží změnit. Avšak masivnějším nástupem bioplastů se celá situace ještě více komplikuje. Z toho důvodu je nutné nastavit efektivní způsoby separace jednotlivých druhů plastů tak, abychom si nekomplikovali svoji narůstající snahu po recyklaci plastů. Navíc je tento krok k nastavení efektivní separace plastů nutný i pro samotnou recyklaci bioplastů. O nutnosti recyklace bioplastů bychom neměli mít pochyb už vzhledem k jejich vyšší cenové náročnosti na výrobu než u konvenčních plastů. Tento článek ve svém závěru přichází s možnými způsoby nastavení odpadního toku plastů a bioplastů a jejich efektivní separace. Přesto, že navrhované způsoby nejsou v současnosti technologicky nijak náročné, tak mohou fungovat pouze budou-li podpořeny mezinárodní legislativou, tedy globálně. Protože, jak bychom jinak mohli chtít v dnešním globalizovaném světě, aby se nám bioplastový odpad, vyrobený například v Asii či Jižní Americe, podařilo efektivně vytrídil v evropském odpadním toku těchto materiálů? Pravděpodobně to jinak nepůjde než nastavit globálně platná pravidla.

Poděkování

Příspěvek vznikl díky institucionální podpoře FA ČVUT v Praze a VŠCHT Praha

Literatura

- 1 T. M. Letcher, *Plastic waste and recycling. Environmental impact, societal issues, prevention, and solutions / edited by Trevor M. Letcher*, Academic Press, Amsterdam, 2020.
- 2 M. Niaounakis, *European Polymer Journal*, 2019, **114**, 464.
- 3 Nakládání s obaly a obalovými odpady, <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/18749>, (accessed 17 March 2021).
- 4 P. Šalanda, *Biodegradabilní plasty v systému nakládání s odpady*, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 2017.
- 5 *Bioplastics from Vegetable Waste: A Versatile Platform for the Fabrication of Polymer Films*, 2020.
- 6 Z. C. Lule and J. Kim, *Materials Chemistry and Physics*, 2021, **258**, 123879.
- 7 Atmospheric CO2 is "our biggest resource" says carbon-negative plastic brand Made of Air, <https://www.dezeen.com/2021/06/24/carbon-negative-plastic-biochar-made-of-air-interview/>.
- 8 *An analysis of European plastics production, demand and waste data*, 2015.
- 9 M. Niaounakis, *Biopolymers. Reuse, Recycling, and Disposal*, Elsevier Science & Technology Books, San Diego, 2013.
- 10 R. Geyer, J. R. Jambeck and K. L. Law, *Science Advances*, 2017, **3**, e1700782.
- 11 J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. L. Law, *Science*, 2015, **347**, 768.
- 12 F. M. Lamberti, L. A. Román-Ramírez and J. Wood, *J Polym Environ*, 2020, **28**, 2551.
- 13 G. Fredi and A. Dorigato, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021, **4**, 159.
- 14 J. B. van Beilen and Y. Poirier, *The Plant Journal*, 2008, **54**, 684.
- 15 L. Fambri, A. Dorigato and A. Pegoretti, *Applied Sciences*, 2020, **10**, 6731.
- 16 M. Niaounakis, *Biopolymers. Processing and products*, William Andrew, Oxford, U.K., Burlington, MA, 2015.
- 17 S. T. Kenny, J. N. Runic, W. Kaminsky, T. Woods, R. P. Babu, C. M. Keely, W. Blau and K. E. O'Connor, *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**, 7696.
- 18 *Biodegradation of plastic film based on starch*, 2016.
- 19 Z. Su, S. Huang, Y. Wang, H. Ling, X. Yang, Y. Jin, X. Wang and W. Zhang, *J. Mater. Chem. A*, 2020, **8**, 14082.
- 20 F. Hajjali, S. Tajbakhsh and A. Shojaei, *Polymer Reviews*, 2018, **58**, 164.
- 21 M. Aslam, M. A. Kalyar and Z. A. Raza, *Polym Eng Sci*, 2018, **58**, 2119.
- 22 K.-S. Kim, J. Yoo, J.-S. Shim, Y.-I. Ryu, S. Choi, J.-Y. Lee, H. M. Lee, J. Koo and S.-K. Kang, *Adv Materials Technologies*, 2022, **7**, 2001297.
- 23 M. H. Rahman and P. R. Bhoi, *Journal of Cleaner Production*, 2021, **294**, 126218.
- 24 A. Maurya, A. Bhattacharya and S. K. Khare, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2020, **8**, 602325.
- 25 J.-G. Rosenboom, D. K. Hohl, P. Fleckenstein, G. Storti and M. Morbidelli, *Nat Commun*, 2018, **9**, 2701.
- 26 N. Pouloupoulou, N. Kasmi, M. Siampani, Z. N. Terzopoulou, D. N. Bikiaris, D. S. Achilias, D. G. Papageorgiou and G. Z. Papageorgiou, *Polymers*, 2019, **11**, 556.
- 27 J. Gasde, J. Woidasky, J. Moesslein and C. Lang-Koetz, *Sustainability*, 2021, **13**, 258.
- 28 E. Worrell and M. A. Reuter, *Handbook of Recycling. State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*, Elsevier Science & Technology Books, San Diego, 2014.
- 29 EHI WHITE PAPER. Udržitelné chytré prodejny 2021, Řešení digitální udržitelnosti pro maloobchod.

Challenges for setting the waste flow of bioplastics

Roman KOVÁŘ^a, Vladimír KOČÍ^{a,b}

^aČeské vysoké učení technické v Praze, Fakulta architektury, Thákurova 9, 166 34 Praha 6 – Dejvice, Czech Republic, e-mail: KOVARRO2@fa.cvut.cz

^b Ústav udržitelnosti a produktové ekologie, VŠCHT Praha, Jankovcova 23, 170 00 Praha 7, Czech Republic, e-mail: Vlad.Koci@vscht.cz

Summary:

The article focuses on the importance of bioplastics in various sectors of the economy and on the possibilities and limits of their management at the end of their life cycle. Bioplastics are used in biomedicine, agriculture and other industries, but currently they are most often discussed in relation to the packaging industry, where about 53% of current bioplastic production is used. The article presents the advantageous properties of the most commonly used bioplastics, but also the limits of their sustainable use and current possibilities for their recycling. The article concludes with proposals to set up the waste stream of plastics and bioplastics so that effective separation is possible, which is a key condition for their recycling.

Keywords: biodegradable plastics, recycling, separation, waste streams