

Česká zemědělská univerzita v Praze



Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb

Bakalářská práce

Biodegradovatelné materiály a jejich využití

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Andrea Smejtková, Ph.D.

Autor práce: Zuzana Korelusová

PRAHA 2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zuzana Korelusová

Technologická zařízení staveb

Název práce

Biodegradovatelné materiály a jejich využití

Název anglicky

Biodegradable Materials and Their Use

Cíle práce

Seznámit se s danou problematikou. Na základě získaných vědomostí porovnat výhody a nevýhody biodegradovatelných a ostatních polymerních materiálů.

Metodika

Osnova

1. Úvod
2. Cíl a metodika
3. Biodegradovatelné materiály
4. Využití biodegradovatelných materiálů
5. Diskuse a závěry

Doporučený rozsah práce

30-40 stran

Klíčová slova

rozložitelnost, škrob, recyklace

Doporučené zdroje informací

Listy cukrovarnické a řepařské: časopis z oboru cukrovarnického průmyslu

Odpady: časopis z oboru odpadového hospodářství

Slejška, A.: Testování biodegradability. Biom, články a sborníky. Praha 1997

Svět balení, Packaging: časopisy z oboru obalové techniky

Volek, V.: Obaly vyrobené z obnovitelných zdrojů a související problematika. Envikongres,

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Andrea Smejtková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2015

doc. Ing. Jan Malafák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 6. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 09. 01. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „*Biodegradovatelné materiály a jejich využití*“ jsem vypracovala samostatně pod vedením Ing. Andrey Smejtkové, Ph.D.. Použitou literaturu a další podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury.

V Praze, dne:

.....

podpis studenta

Poděkování

Děkuji paní Ing. Andree Smejtkové, Ph.D. za poskytnutí cenných rad, připomínek a podnětů. Současně chci poděkovat své rodině a osobě mně nejbližší za podporu a trpělivost při tvorbě této bakalářské práce.

OBSAH:

1. Úvod	1
2. Cíl práce.....	2
3. Metodika.....	2
4. Biodegradovatelné materiály	2
4.1 Definice biodegradovatelného materiálu.....	3
4.2 Rozdělení biodegradovatelných polymerů	4
4.2.1 Agropolymery.....	4
4.2.1.1 Polysacharidy	4
4.2.1.2 Proteiny, lipidy	8
4.2.2 Polymery získávané z mikroorganismů.....	11
4.2.3 Polymery z bio-monomerů	12
4.2.3.1 Polyaktidová (polymléčná) kyselina	12
4.2.4 Biopolymery z fosilních surovin	14
4.2.4.1 Alifatické polymery.....	15
4.2.4.2 Aromatické polyestery	17
4.2.4.3 Polyvinylalkohol	18
4.3 Základní vlastnosti biopolymerních materiálů	19
4.3.1 Tepelné vlastnosti polymerů.....	19
4.3.2 Tahové vlastnosti polymerů	20
4.4 Porovnání základních vlastností bio a konvenčních polymerů	23
5. Využití biodegradovatelných materiálů.....	24
5.1 Obalový průmysl	28
5.2 Tašky a kompostovatelné pytle	31
5.3 Zemědělství	32
5.4 Ostatní aplikace	33
5.5 Označení biodegradovatelných plastů	34
6. Závěr.....	36
7. Seznam použité literatury	38
8. Seznam obrázků, tabulek a použitých zkratk.....	40

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s problematikou biodegradovatelných polymerních materiálů. V hlavní části práce jsou zmapovány jejich základní používané typy, vlastnosti. U těchto jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody. Tyto údaje jsou porovnány s výhodami a nevýhodami použití ostatních základních polymerních materiálů. Poslední část práce je zaměřena na použití biodegradovatelných materiálů v praxi. V závěru práce jsou shrnuty poznatky plynoucí z porovnání a doporučení.

Klíčová slova: rozložitelnost, škrob, recyklace

Summary:

The point of this bachelor thesis is to acquaint the reader with the problematic of biodegradable polymer materials. In the main part of this thesis are described their basic types, features and usage in praxis. There will be also presented their basic advantages and disadvantages. These data will be compared with advantages and disadvantages of other basic conventional polymer materials. The last part of the thesis is focused on usage of the biodegradable materials in praxis. In conclusion are summarized all findings and recommendations.

Key words: dissolubility, starch, recycling

1. Úvod

V dnešní době je úloha plastických hmot velmi důležitá. Prostor jejich využití nacházíme v širokém spektru průmyslových aplikací. Od doby jejich objevu až do dnešních dnů byly jejich chemické i fyzikální vlastnosti dotaženy takřka k dokonalosti. Jejich nespornými výhodami jsou: výborné mechanické vlastnosti, odolnost vůči okolnímu prostředí a zejména relativně nízká pořizovací cena. Díky tomu jejich celosvětová produkce stále stoupá. Konvenční polymery vyrobené z neobnovitelných fosilních zdrojů mají ale jednu zásadní nevýhodu. Tou je jejich rezistence k samovolnému rozkladu přírodní cestou – tj. za působení mikroorganismů a běžných fyzikálních dějů.

Vzhledem k celkovému množství nově vyrobených plastů stoupá každoročně i objem plastového odpadu. Tento odpad je problematický hned z několika hledisek. Prvním z problémů je inertnost takového odpadu – tzn. působením běžně se vyskytujících jevů v přírodě je de facto nerozložitelný. Druhým negativním rysem je jeho relativně obtížná recyklace. Při likvidaci plastového odpadu pálením zase vyvstává problém se vznikajícími, mnohdy karcinogenními, emisemi. Poslední komplikací je pak výchozí surovina (ropa). Jedná se o neobnovitelnou fosilní surovinu, která v posledních letech zaznamenává na světových trzích silné výkyvy cen, které jsou způsobeny mj. politicko-vojenskou situací na středním východě, kde se nacházejí celosvětově největší naleziště této suroviny. Logicky se tak nabízí otázka, zda nevyrábět plasty, které budou mít stejné či obdobné mechanické vlastnosti jako konvenční plasty, ale půjdou vyrobit alespoň částečně z obnovitelných zdrojů. A samozřejmě po skončení životnosti výrobku z nich potom beze zbytku ekologicky zlikvidovat – ideálně na biomasu pro další použití pomocí biodegradace.

V průběhu osmdesátých let minulého století se tak objevují první tzv. bio-plasty. Poptávka po nich pak rapidně stoupá koncem devadesátých let minulého století. Za vzrůstem poptávky pak stojí, mimo ušlechtilých úmyslů, zejména marketingové kampaně nejrůznějších nadnárodních společností, které profitují na svém pro-environmentálním postoji. Vzhledem k tomu, že se ale jedná zejména o promyšlené marketingové tahy těchto velkých hráčů na trhu, vzniká v této problematice mezi laickou veřejností terminologický chaos plný nepřesností a úmyslně zavádějících polopravd.

2. Cíl práce

Cílem této práce je seznámení s problematikou biodegradovatelných polymerních materiálů. A to jak s druhy a vlastnostmi jednotlivých nejběžněji používaných biodegradovatelných materiálů, tak i s jejich výhodami a nevýhodami v porovnání s konvenčními polymerními materiály. Dalším cílem je potom zmapování oblastí nejčastějšího použití biodegradovatelných polymerů v praxi.

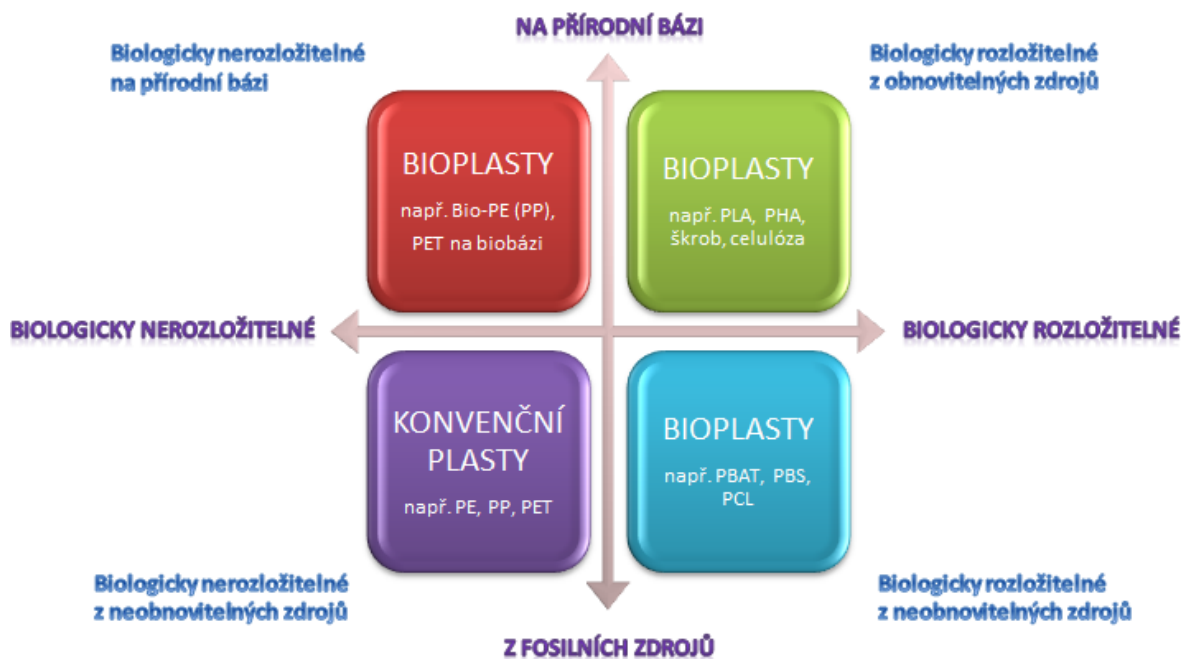
3. Metodika

Metodika byla zvolena tak, aby bylo možno dosáhnout definovaných cílů. V první řadě se jedná o seznámení s danou problematikou. Předpokladem k tomu je intenzivní studium dosažitelné odborné literatury. Nově získané znalosti jsou potom shrnuty do hlavní části práce.

4. Biodegradovatelné materiály

V současné společnosti je tendence všechny plasty marketingově nazývat s přídomkem „bio“. Je to způsobeno zejména globálním trendem západní civilizace co nejvíce se snažit chránit naši planetu a zaručit určitou udržitelnost rozvoje i pro naše potomky. Tato situace je rozhodně chvályhodná, nicméně se setkáváme i s určitou snahou velkých společností profitovat na ochotě lidí investovat do své budoucnosti. Proto se v posledních letech můžeme setkávat s přídomkem „bio“ na skoro každém plastovém obalu. Ne všechny plasty lze ale nazývat plnohodnotnými bioplasty. A jen malou část bioplastů lze nazývat biodegradovatelnými.

Na Obr. 1 lze názorně vidět, že slovem „Bioplasty“ lze označit několik zcela rozdílných materiálů. Od pouhých konvenčních plastů s přidáním biosložky (které ale i přesto nejsou v přírodě rozloženy – typicky 30% bioPET), přes syntetické polymery vyrobené z fosilních surovin, které jsou během své výroby aditivovány tak, aby šly v přírodě rozloženy, až po opravdové bioplasty, které jsou vyrobeny ze 100% obnovitelných zdrojů, a které jdou na konci své životnosti beze zbytku zlikvidovat přírodní cestou.



Obr. 1 Základní rozdělení plastů

Zdroj: (Susheel, 2011) upraveno autorem

4.1 Definice biodegradovatelného materiálu

Za biodegradovatelné lze označit takové materiály, které jsou schopny v bioaktivním prostředí (typicky kompost) podléhat enzymatickému působení přítomných bakterií, hub či řas. To má za následek jejich mechanický rozpad a zásadní změny v jejich chemické struktuře.

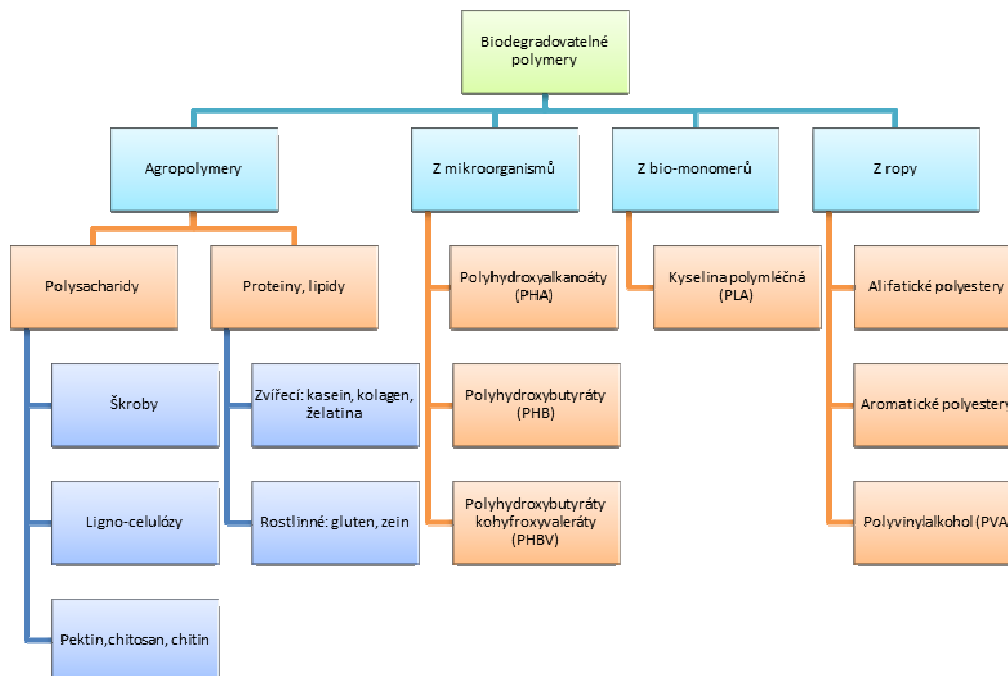
Výsledkem celého procesu biodegradace je rozpad polymerní sloučeniny na následující produkty:

- Oxid uhličitý (CO₂)
- Voda (H₂O) popř. metan (CH₄), pokud dochází k procesu biodegradace v anaerobním prostředí (tzn. bez přístupu vzduchu).
- Zbytková organická biomasa

Z výše uvedeného vyplývá, že cíleným sběrem a kompostováním vybraných biodegradovatelných materiálů můžeme získávat kvalitní, na uhlík bohatou biomasu. Jejím vrácením do zeminy pak lze dosahovat žádoucí koloběh uhlíku v přírodě, což má jednoznačně pozitivní vliv na celkovou udržitelnost výroby těchto biodegradovatelných materiálů.

4.2 Rozdělení biodegradovatelných polymerů

Biodegradovatelné polymery lze z hlediska jejich výchozí suroviny rozdělit na několik skupin. To je názorně vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení biodegradovatelných polymerů z hlediska výchozí suroviny

Zdroj: (Susheel, 2011) upraveno autorem

4.2.1 Agropolymery

Všechny polymery, u kterých jsou používány k výrobě biopolymeru výchozí suroviny, jež mají původ v zemědělské produkci, lhostejno zda v rostlinné či živočišné, nazýváme souhrnným označením agropolymery.

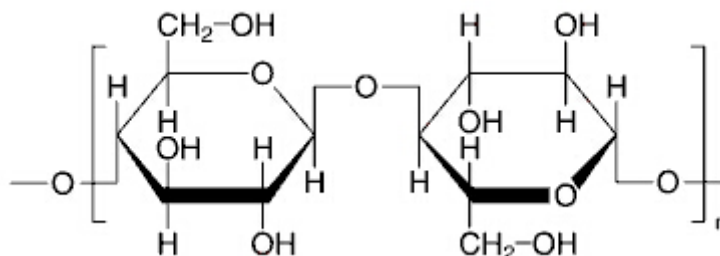
4.2.1.1 Polysacharidy

Nejrozšířenější skupinou sacharidů jsou polysacharidy, které tvoří přibližně 75 % veškeré rostlinné organické hmoty na Zemi. Nejběžnějším polysacharidem je celulóza, které je každým rokem na naší planetě vytvořeno cca 1,5 miliardy tun a zároveň je obdobné množství této hmoty opět v přírodním cyklu rozloženo.

Celulóza

Celulóza se v přírodě nevyskytuje samostatně, ale ve spojení s dalšími látkami – např. hemicelulózou, ligninem, pektiny a vosky. (Kroisová, 2009)

Vzorec konstituční jednotky celulózy je na Obr. 3.



Obr. 3 Vzorec celulózy

Zdroj: https://leporelo.info/pics/pic/celulosa-_vzorec.jpg

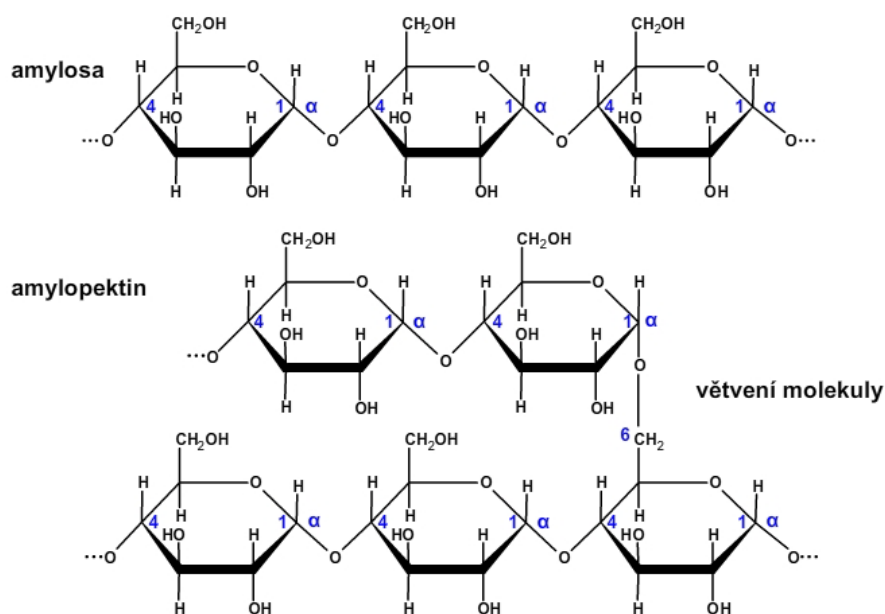
Makromolekuly celulózy jsou nejjednodušším stavebním prvkem hierarchicky vytvářených strukturních vláken, která jsou v podstatě vyztužujícími prvky rostlinných buněčných stěn a zajišťují jejich pevnost a celistvost. Obsah celulózy se liší podle typu rostlinných buněk, podle druhu rostliny i ročního období. Např. bavlníková vlákna obsahují cca 90 % celulózy, dřevo cca 50 % celulózy. Celulóza je pro člověka i většinu zvířat nestravitelná. Stravitelná je pouze pro přežvýkavce a jisté druhy hmyzu a to jen díky bakteriím vylučujícím enzymy nezbytné pro štěpení vazeb v jejich makromolekulách a jejich následný rozklad (Kroisová, 2009).

Nevýhodou celulózy je, že není termoplastická. Je netavitelná a nerozpustná. Dokud ji chemicky nezměníme, nelze ji tvářet. Proto ji přeměňujeme na deriváty, které lze tvářet snadno. Z neznámějších jsou to např. amyloid – pevný, průsvitný pergamen vznikající působením zředěné kyseliny sírové na celulózu, měďnaté hedvábí, jehož základem je měďnatý komplex vytvářející se při rozpouštění celulózy v amoniakálním (čpavkovém) roztoku hydroxidu sodného nebo natroncelulóza, která je základem k výrobě tzv. viskózy, suroviny pro viskózové hedvábí a celofán. (Ducháček, 2006)

Škrob

Druhým nejrozšířenějším rostlinným biopolymerem je škrob. Procesem asimilace se ukládá ve formě škrobových zrn v buňkách zásobních orgánů kukuřice, brambor, obilí, rýže a dalších plodin. Škrob slouží rostlinám jako energetická základna pro jejich růst. Polymerními komponenty škrobu jsou amyloza a amylopektin. Jejich poměr je závislý na druhu rostliny. (Kroisová, 2009)

Vzorec molekuly škrobu je názorně vidět na Obr. 4.



Obr. 4 Molekula škrobu

Zdroj: <http://www.studiumbiochemie.cz/struktury/skrob.jpg>

Škrob je z plodin získáván mechanickým způsobem – surovina je rozdrčena a škrobová zrna jsou separována vypíráním. Více než polovina světové produkce škrobu je využívána v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, dále při výrobě papíru a lepenky, v textilním průmyslu a dalších odvětvích. V současné době je škrob významnou surovinou pro výrobu biodegradovatelných materiálů. (Kroisová, 2009)

Výnosnost amylozy u nejčastějších plodin pěstovaných v ČR názorně shrnuje Tab. 1.

Tab. 1: Výnos amylózy z typických plodin pro ČR

Druh	Výnos [t/ha]	Amylóza ve škrobu [v %]	Výnos amylózy [t/ha]
Pšenice	5.7	25	0,75-1,05
Kukuřice	5.7	25	0,83-1,13
Brambory	30-40	25	1,35-1,18
Hrách	4.6	50-80	1,00-2,20

Zdroj: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Skrob.htm>

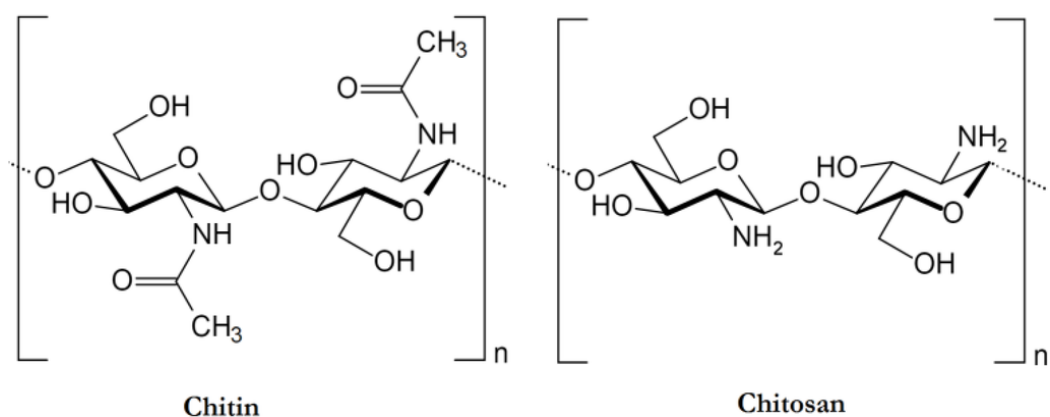
Díky obnovitelnému charakteru suroviny může škrob najít své použití i v řadě dalších výrobků. Jedním z těch velmi perspektivních je plast, který se uplatní jako kompostovatelný obalový materiál (kompostovatelné biopytlíky, nákupní tašky, sáčky na psí exkrementy atd.). Po svém použití se rozloží na skládce nebo kompostu. Taky se ověřují možnosti výroby biologicky odbouratelných mulčovacích fólií z kukuřičného škrobu. Takové plasty po upotřebení nezatěžují přírodu, ale vracejí se do koloběhu živin v půdě – na rozdíl od současných plastových obalů, které neúměrně zatěžují životní prostředí kvůli své dlouhé době rozkladu a jejichž likvidace po použití není snadná. (Konvalina, 2006)

Z přírodního škrobu v práškové formě je možné vyrábět lisováním obaly na potraviny (pohárky, tácky atd.). Např. v USA byl použit škrob k výrobě plastů na sendviče jako náhrada doposud používaných polystyrenových „lastur“. Dokonce se ověřují možnosti nahrazovat škrobovým ekvivalentem PET lahve. (Konvalina, 2006)

Chitin, Chitosan

Dalším velmi frekventovaným biopolymerem je chitin. V přírodě se nachází zejména ve schránkách koryšů, ve tkáních hmyzu a v určitých druzích hub. V praxi se nejčastěji chitin vyrábí ze schránek koryšů. Chitosan je potom produktem průmyslové chemické výroby, kde vstupní surovinou je chitin.

Vzorce molekul chitinu a chitosanu vidíme na Obr. 5.



Obr. 5 Molekula chitinu a chitosanu

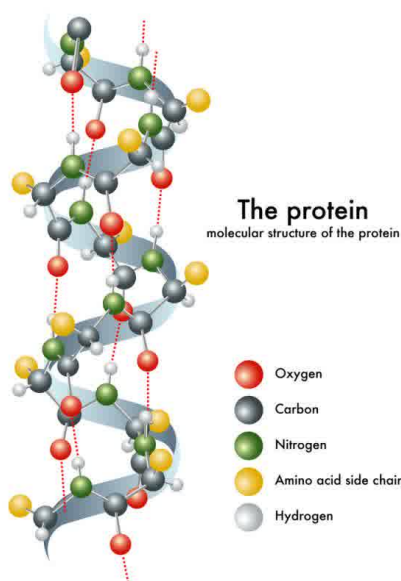
Zdroj: http://www.mdpi.com/marinedrugs/marinedrugs-13-01133/article_deploy/html/images/marinedrugs-13-01133-g001-1024.png

Vlastnosti chitosanu výrazně závisí na molekulové hmotnosti. Chitosan je rozpustný ve vodě a některých organických rozpouštědlech. Rozdíl mezi chitinem a chitosanem je dán jejich rozpustností ve zředěných roztocích slabých kyselin. Chitin a chitosan jsou biokompatibilní, vykazují schopnost zastavovat krvácení a omezují srážlivost krve, což je předurčuje k použití v lékařství. Tenké filmy, které z nich lze snadno vytvářet, jsou propustné pro vzduch, což je další vlastnost využitelná především při regeneraci tkání. Tenké fólie se používají především v potravinářském průmyslu a zemědělství. Polymery na bázi chitinu a chitosanu je možné dobře zpracovávat extruzí. Jde o polymer, který je požitelný, což rozšiřuje možnosti jeho využití i v dalších odvětvích. Produkci chitinu a chitosanu se v současné době zabývá více než 60 společností, z nichž polovina se nachází v Asii. (Kroisová, 2009)

4.2.1.2 Proteiny, lipidy

Bílkoviny mají mezi všemi přírodními látkami zcela zvláštní postavení, neboť bez nich není možná existence žádného živého organismu. Jsou součástí všech živých buněk. Mezinárodně používaný termín „protein“ byl poprvé použit německým chemikem Mulderem na návrh Berzeliův r.1838. O několik let později Justus von Liebig zavedl pojem „Eiweisskörper“, ze kterého překladem vzniklo české slovo bílkovina. (Ducháček, 2006).

Ilustraci vzhledu proteinu najdeme na Obr. 6.



Obr. 6 Ilustrační obrázek proteinu

Zdroj: http://panduanhidupsehat.com/wp-content/uploads/2014/05/45-struktur-molekul-protein-breakingmuscle.com_.jpg

Proteiny jsou vysokomolekulární přírodní látky vytvořené kombinacemi všech dvaceti známých aminokyselin. V podstatě jde o řetězce α -aminokyselin spojených mezi sebou peptidickou vazbou. Vykazují relativní molekulovou hmotnost až 1 000 000 a jsou degradovatelné působením enzymů. (Kroisová, 2009)

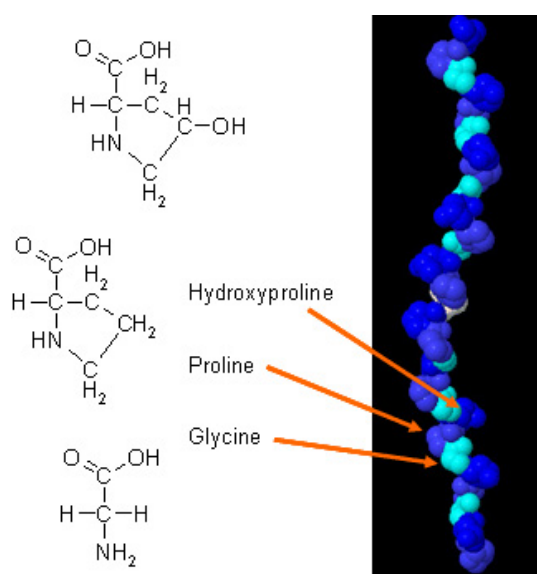
Jsou základem všech živých organismů a jsou konstruovány tak, aby v něm plnily různé funkce: stavební (keratin, kolagen, elastin), transportní a skladovací (hemoglobin, transferin), zajišťující pohyb (myosin, aktin) a další funkce katalytické, regulační, řídicí, ochranné a obranné. Mohou být rozdělovány do dvou skupin, na živočišné proteiny (kasein, keratin, kolagen, želatina) a na rostlinné proteiny (z brambor či ze sóji). (Kroisová, 2009)

Kolagen

Kolagen je vláknitá ve vodě nerozpustná bílkovina tvořící základ pojivových tkání, tedy vaziv, chrupavek a kostí. Tvoří 25 - 30 % všech proteinů v těle savců, 70 % kůže a dokonce 10 % naší celkové hmotnosti. Slovo kolagen má původ v řeckém kolla, což znamená kliš. A právě kliš se vařil ze zvířecích šlach. Molekuly kolagenu tvoří převážně: glycin (nejjednodušší neesenciální aminokyselina tvořená dvěma uhlíky), prolin (neesenciální aminokyselina, 2-pyrrolidinkarboxylová kyselina), hydroxyprolin (přírodní aminokyselina,

derivát pyrrolu, vznikající hydroxylací prolinu za účasti kyseliny askorbové) a hydroxylysin (přírodní aminokyselina, vzniká hydroxylací bazické esenciální aminokyseliny lyzin za účasti kyseliny askorbové). Základní jednotkou kolagenu je tropokolagen - řetězce alfa 1 a alfa 2 tvořící trojitou spirálu. Kolagenní vlákna jsou měkká, ohebná, nepružná a vysoce pevná v tahu. (Kolektiv, 2015)

Jedním z hlavních použití kolagenu je výroba želatiny a klihu. Využití ale nachází i jako materiál pro výrobu požitelných obalů (např. střívka na uzeniny). Díky svým vlastnostem má však svou úlohu i v medicíně a kosmetice. Strukturální vzorec kolagenu můžeme vidět na Obr. 7.



Obr. 7 Strukturální vzorec kolagenu

Zdroj: http://www.proteopedia.org/wiki/images/e/e5/Collagen_%28alpha_chain%29.jpg

Želatina

Želatina je získávána z kolagenu, vykazuje vysokou rozpustnost v horké vodě, ale má i další výhody jako resorbovatelnost přímo v organismu. Její fyzikálně chemické vlastnosti mohou být velmi dobře modifikovány. (Kroisová, 2009)

K jejím hlavním přednostem patří schopnost vytvořit po rozpuštění a opětovném zchlazení rosol (želé). Tento proces lze pak provádět i opačně – po zahřátí lze z rosolu dostat zpět kapalnou fázi a po zchlazení opět dojde ke vzniku želé. Této vlastnosti se využívá zejména v potravinářství či kosmetice. Želatina má ale své uplatnění i v medicíně (jako materiál pro

výrobu kapslí s léčivý). Nepostradatelná je pak ve fotografickém průmyslu, kde tvoří základní surovinu pro výrobu světlo citlivé emulze (na filmu i fotografiích). Při výrobě plastů potom želatina funguje jako regulátor velikosti částic.

Kasein

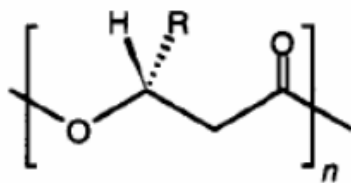
Kasein se průmyslově získává srážením kyselinami z podmásli. Po usazení se sraženina pere ve vodě a vysušením se získá práškový produkt rozpustný ve vodných alkalických roztocích. Rozpustnost kaseinu lze potlačit jeho vystavením účinku zvýšené teploty (150 °C). Kasein je klasickým lepidlem pro papír, dřevo a textil a základní surovinou k výrobě plastů zpracovávaných buď lisováním, nebo zvlákňováním (Ducháček, 2006).

Pro výrobu lisovacích hmot se kasein, zvlhčený 20 % až 25 % vody, mísí změkčovadly (např. albuminem, želatinou, parafíny, glycerinem, nitrocelulózou, acetátem celulózy), plnivy (např. křídou, kaolinem, síranem nebo uhličitanem vápenatým a pigmenty. Vytvrzuje se roztokem formaldehydu. Výsledný plast je bez zápachu a nehořlavý. Odolává alkoholu, ether, benzenu, tukům a olejům. Ve vodě bobtná. (Ducháček, 2006)

4.2.2 Polymery získávané z mikroorganismů

Některé přírodní polyestery jsou produkovány bakteriemi tehdy, mají-li k dispozici nadbytek uhlíku. V podstatě se jedná o tvorbu zásobních látek, které jsou uloženy ve formě granulí v cytoplazmě a které bakterie spotřebuje, nemá-li jiný zdroj obživy. Do kategorie polyesterů produkováných bakteriemi patří např. polyhydroxyalkanoáty (PHA), mezi které se řadí polyhydroxybutyráty (PHB), polyhydroxyvalerát (PHV), jejich kopolymer polyhydroxybutyrát-valerát (PHBV). (Kroisová, 2009)

Na Obr. 8 můžeme vidět obecné schéma polyhydroxyalkanoátů. Pro představu konkrétního polyesteru je třeba místo naznačené relativní vazby R dosadit správný monomer či polymer, který je součástí obrázku.



- 1: PHA, R = various alkyl, alkenyl, and aryl groups (C₁₋₁₁)
- 2: PHB, R = CH₃
- 3: PHBV (Biopol), R = CH₃, CH₂CH₃

Obr. 8 Obecné schéma polyhydroxyalkanoátů

Zdroj: (Rhim, 2007)

Zajímavé jsou především vlastnosti polyhydroxybutyrátu, neboť se velmi podobají vlastnostem polypropylenu, ale se schopností biodegradace. Polyhydroxybutyrát má teplotu tání 180 °C, teplotu skelného přechodu 5 °C a vysokou molární hmotnost. Jedná se o materiál tuhý, odolný vůči oxidaci, nerozpustný ve vodě a relativně odolný proti hydrolyze, čímž se liší i od ostatních biopolymerů. Přírodní polyestery jsou v současnosti produkovány synteticky v bioreaktorech, kde se na substrátech obsahujících vhodný zdroj uhlíku pěstují mikroorganismy. Po dosažení potřebného objemu polyesteru jsou buněčné stěny narušeny a polymer je separován. (Kroisová, 2009)

Biopolymery z mikroorganismů mají široké spektrum možného použití. V současné době ale jejich masovému používání brání vyšší cena této suroviny. Z tohoto důvodu se v současné době používají spíše jen v lékařství a kosmetice.

4.2.3 Polymery z bio-monomerů

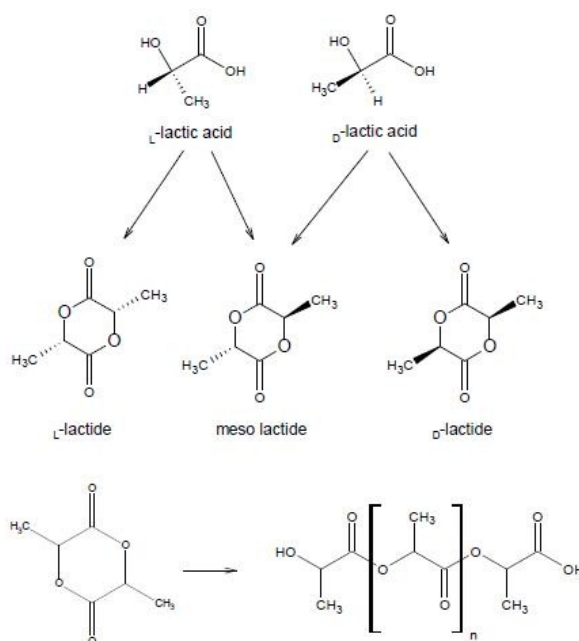
V přírodě se vyskytuje celá řada přirozených monomerů, které lze polymerovat. Vzhledem k tomu, že vznikají syntetickou cestou z původně přírodních monomerů, nazýváme je syntetickými biopolymery. Jejich velkou výhodou je, že vykazují fyzikální vlastnosti, které jsou srovnatelné s konvenčními polymery, ale přitom si zachovávají biodegradovatelnost.

4.2.3.1 Polyaktidová (polymléčná) kyselina

Kyselina polymléčná (PLA) patří do skupiny biodegradabilních polyesterů, což znamená, že má schopnost být v životním prostředí postupně štěpena účinky povětrnosti a mikrobiálních procesů na oligomery až samotný monomer. PLA lze jako jeden z mála polymerů řízeně odbourávat i chemicky zpět na monomer, který může být znovu použit na

výrobu plnohodnotného polymeru – PLA. Pro aplikační využití je možné používat PLA rovněž ve formě polymerních směsí s jinými polymery, jako jsou například velkoobjemově vyráběné polyolefiny. (Petruš, 2011)

Vyráběná kyselina polymléčná (PLA) má strukturu lineárního polyesteru, který vzniká tzv. „ring opening polymerization“ laktidu kyseliny mléčné, tj. polymerací za otevření kruhu viz. obr. 9. (Petruš, 2011)



Obr. 9 Schéma vzniku PLA

Zdroj: <http://www.chempoint.cz/kyselina-polymlecna-nejen-jako-biodegradabilni-polymer>

Výchozí kyselinu mléčnou pro přípravu laktidu je možné získat fermentačním kvašením glukózy. Surovina je získávána štěpením škrobu extrahovatelného z běžných zemědělských plodin, nejčastěji kukuřice, cukrové řepy a cukrové třtiny. (Petruš, 2011)

Jedná se o nejpopulárnější biodegradovatelný polymer, který je v současné době vyráběn ve světovém měřítku. Firma Natureworks má závod s kapacitou výroby 130 000 tun v Blair v Nebrasce a vyrábí PLA pod obchodním názvem Ingeo (Kolektiv, 2015).

PLA je plně biodegradovatelná. Biodegradace probíhá hydrolyzou esterových vazeb kyseliny mléčné, která je přeměňována mikroorganismy na vodu a oxid uhličitý.

Biodegradace probíhá při běžných laboratorních teplotách pomalu. Dojde-li ke zvýšení biodegradační teploty nad teplotu skelného přechodu, která se pohybuje kolem 55 °C zvyšuje se rychlost rozkladu. Při kompostování (teplota 60 °C – 70 °C) s ostatní biomasou nastává biodegradace během jednoho až dvou týdnů a materiál je následně rozložen na oxid uhličitý, vodu a zbytek biomasy do jednoho měsíce. (Kroisová, 2009)

Nejširší uplatnění nacházejí výrobky z PLA zejména v obalovém průmyslu pro potravinářství (zejména kelímky, lahve, průsvitné folie, jednorázové příbory a tácky apod.). Díky mechanickým vlastnostem PLA lze z této suroviny připravovat i vlákna. To lze velmi efektivně využít v textilním průmyslu.

4.2.4 Biopolymery z fosilních surovin

Mezi biopolymery lze zařadit i některé polymery, které jsou vyráběné synteticky z fosilních surovin. Díky speciálnímu výrobnímu procesu je docíleno toho, že dosahují mechanických vlastností jako konvenční polymery, ale splňují podmínky biodegradovatelnosti.

Z hlediska našeho zájmu (tzn. obalové materiály) lze tyto polymery rozdělit na dvě hlavní skupiny:

1. Polyestery

- a. Alifatické polyestery
- b. Aromatické polyestery

2. Polyvinylalkohol

Z předchozího rozdělení vyplývá, že biodegradabilní polymery, které se vyrábějí z fosilních surovin lze rozdělit na dvě základní skupiny Polyestery, které se dále dělí na alifatické a aromatické a na druhou skupinu polyvinylalkohol.

Pro lepší orientaci v rozdělení alifatických a aromatických polyesterů je zařazena Tab. 2, ve které jsou názorně uspořádány deriváty obou skupin polyesterů, jejich původ a způsob jejich výroby. Zkratky typů derivátů jsou vysvětleny dále v textu.

Tab. 2: Biodegradovatelné polyestery

Skupina		Typ	Deriváty	Původ	Výroba	
Polyestery	alifatické	PGA		přírodní/minerální	synteticky	
		PLA		přírodní/minerální	synteticky	
		PBS	PBSA	minerální	synteticky	
		PCL		minerální	synteticky	
	aromatické	PBT	PBAT		minerální	synteticky
			PBST		minerální	synteticky
			PTMAT		minerální	synteticky

Zdroj: (Kroisová, 2009)

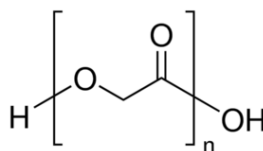
4.2.4.1 Alifatické polymery

Synteticky vyráběné alifatické polyestery jsou obecně náchylné k hydrolýze a jsou biodegradovatelné. Mezi alifatické polyestery patří kyselina polyglykolová (PGA) a kyselina polyaktidová (PLA). Obě kyseliny spolu mohou vytvářet kopolymery. Jistou zvláštností je jejich dvojitý původ – mohou být vyrobeny jak z monomerů vyskytujících se v přírodě, tak z minerálních zdrojů. (Kroisová, 2009)

Dalšími materiály z této skupiny jsou polykaprolakton (PCL), polybutylensukcinát (PBS) a jeho derivát polybutylensukcinát adipát. (Kroisová, 2009)

Polyglykolová kyselina (PGA)

Polyglykolová kyselina představuje tuhý termoplastický materiál, který má jako jednu ze svých základních vlastností vysokou schopnost krystalizace v rozmezí 45 až 75 %. K výrobě se používá glykosid a diester kyseliny glykolové. Vzhledem ke své vysoké krystalizaci je odolná k působení většiny organických rozpouštědel, ale je naopak velmi citlivá k působení vody a tedy k hydrolýze. Pro názornost je na Obr. 10 znázorněn vzorec molekuly PGA.



Obr. 10 Vzorec molekuly PGA

Zdroj: http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/structure1/077/mfcd00148011.eps/_jcr_content/renditions/mfcd00148011-medium.png

Asi nejdůležitější vlastností PGA je, že produktem její biodegradace je kyselina glykolová, jež je přirozeně přítomná v lidském těle. Z tohoto důvodu je PGA velmi hojně používána v medicíně pro výrobu vstřebatelných stehů, implantátů a pro řízené uvolňování léčiv.

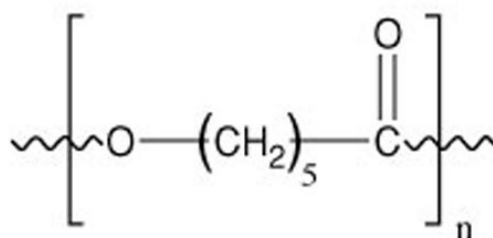
Polybutylensukcinát (PBS)

Polybutylensukcinát patří do skupiny biodegradovatelných alifatických polyesterů vyráběných synteticky. PBS vykazuje vlastnosti podobné polyethylentereftalátu (PET). Krystalinita PBS je v rozmezí 35 až 45%, teplota skelného přechodu se pohybuje kolem 32 °C a teplota tání je cca 114 °C, PBS se obvykle kombinuje se škrobem, cílem je modifikace jeho vlastností. (Kroisová, 2009)

Polykaprolakton (PCL)

Polykaprolakton je připravován polymerizací ε-kaprolaktonu za přítomnosti katalyzátorů. Je to semikrystalický materiál s teplotou skelného přechodu kolem -60 °C a teplotou tání kolem 60 °C. Ve srovnání s PGA a PLA degraduje méně. Je využíván v lékařství jako nosný materiál při tvorbě systém pro dlouhodobé uvolňování léčiv. (Kroisová, 2009)

Pro úplnost je na Obr. 11 znázorněn vzorec molekuly PCL.



Obr. 11 Vzorec molekuly PCL

Zdroj: <http://3.imimg.com/data3/IJ/EW/MY-5551834/polycaprolactone-500x500.jpg>

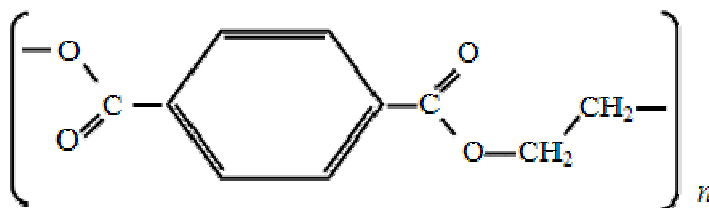
Polyetylensukcinát adipát (PBSA)

Polyetylensukcinát adipát se svými vlastnostmi blíží nízko hustotnímu polyetylenu (LDPE). Krystalinita PBSA je ve srovnání s PBS nižší, jen 20 až 35%, teplota skelného přechodu se pohybuje kolem $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota tání je cca $93\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Kroisová, 2009)

Oba tyto polymery mohou být zpracovávány konvenčními zpracovatelskými metodami (vyfukováním, extruzí, vstřikováním). Využívají se zejména pro výrobu balících a mulčovacích fólií, tašek a hygienických výrobků. (Kroisová, 2009)

4.2.4.2 Aromatické polyestery

Aromatické polyestery se připravují polykondenzací alifatických diolů a aromatických dikarboxylových kyselin. Aromatický kruh poskytuje polymeru výbornou odolnost k hydrolýze a působení chemických sloučenin (Obr. 12). Hydrolýza je velmi obtížná a tedy i biodegradovatelnost není možná. Nejznámější příklady aromatických polyesterů jsou např. polyethyltereftalát (PET) a polybutyltereftalát (PBT), které mohou být modifikovány přísádky monomerů citlivých k hydrolýze (etherů, amidů, alifatických skupin). Tato modifikace mění nehydrolizované aromatické polyestery v hydrolyzovatelné alifaticko-aromatické polyestery s následnou schopností biodegradace. (Kroisová, 2009)



Obr. 12 Vzorec molekuly PET

Zdroj: http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/soubory/12_03/vzorec03.gif

Polybutylenadipát tereftalát (PBAT)

Tento materiál patří do skupiny aromatických polyesterů. Jeho složení vychází z polymerizace polyethyltereftalátu s různými alifatickými monomery, která vytvářejí v polymerním systému slabá místa citlivá k hydrolyze. Tento biodegradovatelný polymer se využívá k výrobě širokého spektra produktů (tašek, fólií pro zemědělství, květináčů, kuchyňského náčiní na jedno použití). Např. mez pevnosti v tahu lze měnit od hodnot adekvátních hodnotám nízko hustotního polyethylenu až po hodnoty pevných aromatických polyesterů. (Kroisová, 2009)

Polytetramethylenadipát tereftalát (PTMAT)

Jde o termoplastický materiál podobný nízko hustotnímu polyethylenu, ale s lepšími mechanickými vlastnostmi. Zpracovává se extruzí na flexibilní fólie odolné proti roztržení. Je odolný proti působení vody a je využíván k výrobě prodyšných fólií pro balení tam, kde je využitelná jeho mírná propustnost pro vodní páry. Teplota skelného přechodu je cca -30 °C a teplota tání cca 115 °C. (Kroisová, 2009)

4.2.4.3 Polyvinylalkohol

Polyvinylalkohol (PVA) je bílý prášek, zřetelně krystalického charakteru. Jeho odolnost vůči rozpouštědlům závisí na obsahu nezhydrolyzovaného polyvinylacetátu, na střední molekulové hmotnosti a také na teplotě. Polymer s více než pětiprocentním obsahem vinylacetátových jednotek se již rozpouští ve vodě jen při teplotách nad 65 °C. Čím vyšší je jeho molekulová hmotnost, tím menší je jeho rozpustnost. V olejích není rozpustný ani při vyšších teplotách. V jednosytných alkoholech bobtná, ve vícesytných (např. v glycerolu) se

rozpouští, zvláště za tepla. Z kyselin odolává organickým, ve vodných roztocích anorganických kyselin a jejich solí přechází při teplotách nad 160 °C na viskózní až nerozpustnou hmotu. Je málo termoplastický. Lze jej použít za teplot od -50 °C do 130 °C, nad 200 °C se rozkládá. (Ducháček, 2006)

Svým chováním polyvinylalkohol v mnohém připomíná želatinu. Proto se používá např. v potravinářství pro přípravu ovocného želé, v chemickém průmyslu jako ochranný koloid pro suspenzi polymerace, dále jako zahušťovadlo pro nátěrové hmoty, k výrobě lepidel (v kombinaci se škrobem) a impregnačních hmot odolných benzínu. Olejům, tukům a rozpouštědlům. Známé je také jeho použití jako separačního činidla při zpracování nenasycených polyesterových pryskyřic na lamináty. Vyrábějí se z něj obalové folie, chirurgické nitě, textilní vlákna, různá těsnění, hadice a další výrobky. (Ducháček, 2006)

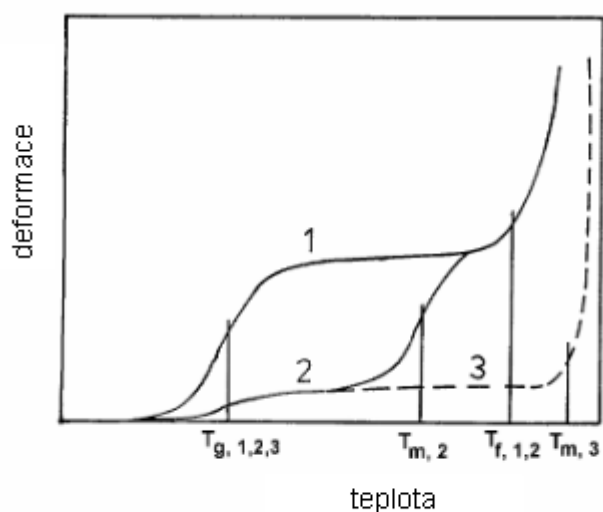
4.3 Základní vlastnosti biopolymerních materiálů

Stejně tak jako ostatní druhy materiálů i polymerní materiály vykazují velké množství nejrozličnějších mechanických vlastností. Nejzásadnější z těchto vlastností lze následně mezi sebou porovnávat a zjišťovat tak vhodnou aplikaci daného biopolymeru. Stejně tak lze porovnat tyto vlastnosti mezi biopolymery a těmi synteticky vyrobenými. Z tohoto porovnání potom bude jasně patrné, kterým biodegradovatelným polymerem lze nahradit konvenční polymer. Abychom si takové porovnání mohli provést, je třeba definovat základní vlastnosti plastů, které budeme porovnávat.

4.3.1 Tepelné vlastnosti polymerů

Typickou charakteristikou polymerů je tzv. teplota skelného přechodu T_g , která určuje použití daného polymeru (Obr. 13). Pod T_g je polymer tuhou a poměrně křehkou látkou, je ve sklovitém stavu. T_g je ovlivněna strukturou polymeru, zejména ohebností řetězce. Se zvyšující se objemností postranních substituentů řetězce T_g roste. Nad T_g polymer přechází do kaučukovitého stavu. Dalším zahříváním nad teplotu tečení T_f se dostává do plastického stavu, kdy je možno polymer zpracovávat. T_g se týká pouze amorfní oblasti polymeru. V případě částečně krystalického polymeru má materiál jak T_g , tak teplotu tání T_m . T_m je vždy vyšší než T_g . T_f může ležet nad i pod T_m polymeru. Se zahříváním polymeru a přechodem přes jednotlivé stavy se zásadně mění řada vlastností, např. specifický objem, viskozita, tepelná kapacita, mechanické vlastnosti. T_g , T_m a T_f tak určují teplotní interval, ve kterém

může být polymerní materiál aplikován nebo být zpracováván do tvaru konkrétního výrobku. (Merna, 2013)



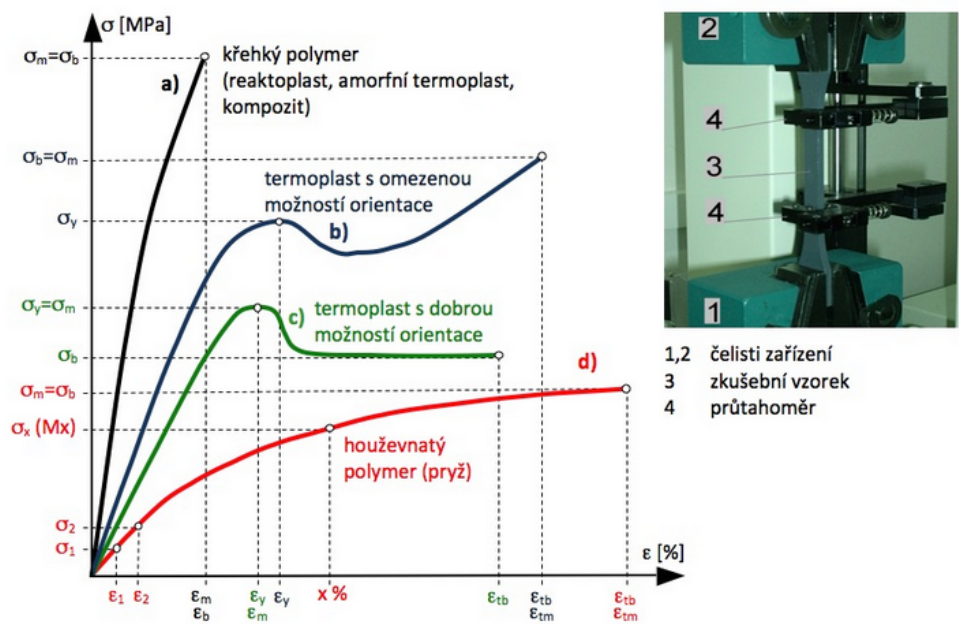
Termomechanická křivka amorfního (1) a dvou různých krystalických (2,3) polymerů. T_g - teplota zesklňování, T_m - teplota tání, T_f - teplota toku.

Obr. 13 Obecná termomechanická křivka

Zdroj: (Ducháček, 2006)

4.3.2 Tahové vlastnosti polymerů

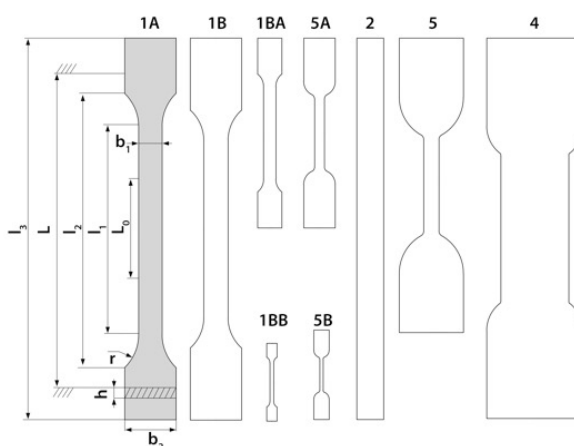
Tahové charakteristiky materiálu jsou jeho nejzákladnějšími mechanickými charakteristikami. Jestliže je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné průběh deformace, resp. poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí sledovat pomocí deformační křivky (viz obr. 14), která poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu. Tato závislost je určována experimentálně. Zkušební těleso je uchyceno do čelistí zkušebního stroje a na těleso je nasazen průtahoměr. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly (F), resp. napětí (snímané dynamometrem) na poměrném prodloužení zkušební vzorku (snímané průtahoměrem), případně na jmenovitém poměrném prodloužení, určeném z pohybu příčnicku zkušebního stroje (používá se u tvárných materiálů). (Běhálek, 2015)



Obr. 14 Deformační křivka polymeru

Zdroj: (Běhálek, 2015)

Tvar a rozměry zkušebních těles jsou přesně definovány normou pro konkrétní materiál. Většinou se však používají tělesa tvaru oboustranných lopatek, takzvaných osmiček, která umožňují dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech, a napětí je přitom koncentrováno do zúžené části vzorku (viz obr. 15). Pro sledování tahových vlastností kaučuků lze použít také zkušební tělesa ve tvaru kroužků. Pro fólie či desky lze použít pásků. (Běhálek, 2015)



Obr. 15 Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku

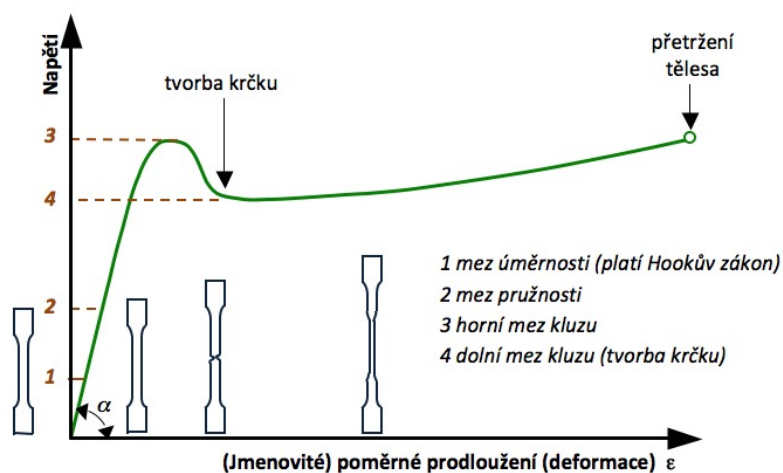
Zdroj: (Běhálek, 2015)

Z deformační křivky určujeme pevnostní charakteristiky jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení. Značení jednotlivých charakteristik, které je použito v textu, vychází z mezinárodního předpisu pro plasty. Elastomery používají jiná značení, ale význam těchto charakteristik je shodný. (Běhálek, 2015)

Mez pevnosti (σ_m) – je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_{max}) naměřené v průběhu zkoušky. Mez pevnosti nemusí vždy souhlasit s napětím v okamžiku porušení zkušební tělesa (viz obr. 14). Jeho hodnota se u plastů pohybuje při standardní teplotě okolí v rozmezí od 15 MPa do 100 MPa (u vyztužených plastů až do 170 MPa), u běžných elastomerů pak v oblasti od méně než 7 MPa do přibližně 28 MPa. (Běhálek, 2015)

Napětí na mezi kluzu (σ_y) – je napětí, při kterém začíná vznikat plastická (trvalá) deformace a začíná se tvořit tzv. krček (viz obr. 16), který se dále s rostoucím napětím rozšiřuje. Napětí na mezi kluzu považujeme za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti, neboť jejím překročením vznikají velké trvalé deformace. U semikrystalických plastů s nižším obsahem krystalinity je napětí na mezi kluzu shodné s mezí pevnosti (viz obr. 14, křivka c). (Běhálek, 2015)

Napětí při přetržení (σ_b) – je napětí, kdy dojde k porušení zkušební tělesa. U křehkých polymerů (např. amorfních termoplastů, reaktoplastů a kompozitů) může být shodné s napětím na mezi pevnosti (viz obr. 14, křivka a). (Běhálek, 2015)



Obr. 16 Typická deformační křivka pro semikrystalické termoplasty

Zdroj: (Běhálek, 2015)

Úpravou Hookova zákona (viz rovnice 1) lze vypočítat modul pružnosti. Pokud bychom jej chtěli vyjádřit graficky, jedná se o směrnici lineární části deformační křivky, resp. tangentu úhlu alfa (viz obr. 16). (Běhálek, 2015)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (1)$$

E – modul pružnosti v tahu [Pa]

σ – napětí v tahu [Pa]

ε – relativní deformace [-]

Viskoelastické chování plastů způsobuje u tahových vlastností nelineární průběh deformační křivky i v její počáteční oblasti. Tento efekt je zřejmý zejména u houževnatých polymerů. Proto měření modulu pružnosti v tahu (E_t) vychází u polymerů ze dvou hodnot napětí (σ_1, σ_2), které odpovídají hodnotám poměrného prodloužení $\varepsilon_1=0,05$ % a $\varepsilon_2=0,25$ % (viz rovnice 2) a velmi často bývá nazýván jako sečný modul pružnosti. (Běhálek, 2015)

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [MPa] \quad (2)$$

4.4 Porovnání základních vlastností bio a konvenčních polymerů

Na základě výše uvedených parametrů můžeme provést porovnání vybraných biodegradovatelných polymerů s vybranými konvenčními polymery v následujících dvou tabulkách Tab. 3 a Tab. 4 .

Tab. 3: Hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických parametrů některých komerčních syntetických polymerů

Polymer	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Prodloužení při lomu [%]
PE-LD	-12,5	98-115	8 - 20	300 - 500	100 - 1000
PP	-13	176	25 - 40	1100 - 1600	700 - 800
PS	80	100	32 - 60	2300 - 3200	3 - 4
PVCC	83	273	45 - 65	3000 - 5000	29 - 50
PA6	52	220-250	75 - 85	2500 - 3200	50 - 130
POM	-82	181	70	2800 - 3500	10 - 14
PETP	67	-	55 - 74	2800 - 3100	50 - 150
PC	140-170	225	60 - 65	2000 - 2200	80 - 120
PPO	210	315	80 - 70	2200 - 2500	60

Zdroj: (Kroisová, 2009)

Tab. 4: Hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických parametrů některých komerčních biodegradovatelných polymerů

Polymer	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Prodloužení při lomu [%]
PCL	-60	59 - 64	4 - 28	390 - 470	700 - 1000
Škrob	-	110 - 115	35 - 80	600 - 850	580 - 820
PBAT	-30	110 - 115	34 - 40	-	500 - 800
PTMAT	-30	108 - 110	22	100	700
Celulóza	-	-	55 - 120	3000 - 5000	18 - 55
PLA	40 - 70	130 - 180	48 - 53	3500	30 - 240
PHB	0	140 - 180	25 - 40	3500	5 - 8
PHA	-40	70 - 170	18 - 24	700 - 1800	3 - 25
PHB-PHV	0 - 30	100 - 190	25 - 30	600 - 1000	7 - 15
PVA	58 - 85	180 - 230	28 - 46	380 - 530	100 - 200
PGA	35 - 40	225 - 230	890	7000 - 8400	30
PEA	-20	125 - 190	25	180 - 220	400

Zdroj: (Kroisová, 2009)

Z hodnot v Tab. 3 a 4 vyplývá, že biodegradovatelné polymery (plasty) mohou nabídnout velmi silný potenciál z hlediska náhrady konvenčních polymerů (plastů). Samozřejmě je nutné vzít v potaz, že téměř vždy bude nutné udělat při výběru biopolymeru určitý kompromis mezi cenou suroviny a nabízenými vlastnostmi. Cena biodegradovatelných polymerů je bohužel stále velmi limitujícím faktorem při jejich použití v praxi.

5. Využití biodegradovatelných materiálů

Z předchozích kapitol je jasně patrné, že biodegradovatelné materiály mohou svými vlastnostmi směle konkurovat konvenčním syntetickým polymerům. Stejně jako u syntetických materiálů mají různé typy biodegradovatelných materiálů rozlišné použití. Názorně shrnuté výhody, nevýhody a nejběžnější aplikaci v praxi u jednotlivých biodegradovatelných polymerů nalezneme v Tab. 5. Nalezneme zde i informaci o obnovitelnosti výchozí suroviny pro výrobu finálního plastu. To je důležitý faktor při hodnocení celkového přínosu konkrétního biodegradovatelného materiálu pro celý ekosystém.

Tab. 5: Přehled obecných vlastností biodegradovatelných polymerů

Základní polymer	Surovinový zdroj	Výhody	Nevýhody	Možné aplikace
Škrob	obnovitelný	nízká cena rychlý proces biodegradace	špatné mechanické vlastnosti hydrofilní	pěnové materiály fólie tašky odlévané součásti
Polyhydroxy alkanooáty	obnovitelný	rychlý proces biodegradace odolný vůči vodě	vysoká cena	odlévané součásti
Celulóza acetát celulózy	obnovitelný	vysoká pevnost odolný vůči vodě	obtížně zpracovatelné velmi malá schopnost biodegradace	kompozity vláknité desky
Polymery na bázi mastných kyselin	obnovitelný	vysoká pevnost	křehké nízká schopnost biodegradace	kompozity adheziva kompatibilizátory
Polymery na bázi ligninu	obnovitelný	vysoká pevnost	křehké nízká schopnost biodegradace	kompozity adheziva kompatibilizátory
Polymery na bázi kolagenu a želatiny	obnovitelný	vysoká pevnost	obtížně reprodukovatelné vlastnosti	fólie
Kyselina polyaktidová	obnovitelný i neobnovitelný	vysoká pevnost	křehké	vstřikování výroba vláken
Kyselina polyglykolová	neobnovitelný	vysoká pevnost	křehké rozpuštěné ve vodě	vlákna šicí materiál
Polykaprolakton	neobnovitelný	stabilní vůči vodě hydrolizovatelný	nízká teplota tání	kompostovatelné tašky balící materiály pro nízké teploty
Polyvinylalkohol	neobnovitelný	dobré bariérové vlastnosti	nízká schopnost biodegradace rozpuštěné ve vodě	vlákna fólie
Syntetické polyestery	neobnovitelný	vysoká pevnost dobrá opracovatelnost	relativně vysoká cena	fólie odlévací součásti

Zdroj: (Kroisová, 2009)

Pro doplnění Tab. 5 a dotvoření ucelené představy o možnostech použití biodegradovatelných materiálů v praxi nám dobře poslouží Tab. 6. V té je názorně zobrazeno,

pro jaký konkrétní druh zpracování se hodí daný biopolymer. Což je velmi zásadní parametr, který dále ovlivňuje možnost použití konkrétního materiálu.

Tab. 6: Možnosti zpracování nejrozšířenějších biopolymerů

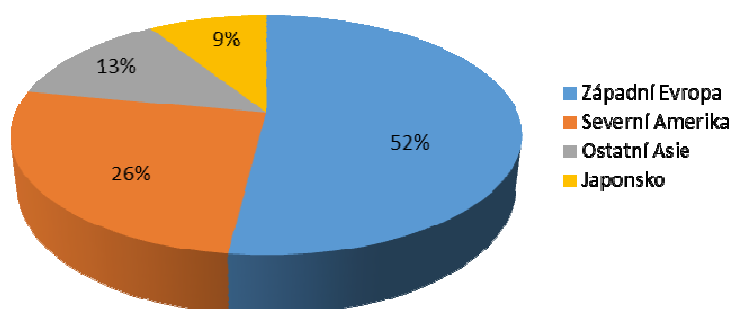
Typ polymeru	Vstřikování	Vytlačování (extruze)	Odlévání	Vyfukování	Spřádání vláken	Tvarování za tepla
Škrob	X	X	X	-	-	-
Celulóza	X	X	-	X	-	-
PHB	X	X	X	X	-	X
PHB-PHV	X	X	X	X	X	X
PLA	X	X	-	X	X	X
PBS	X	-	-	-	-	-
PCL	X	X	-	X	X	X
PBST	X	X	X	X	-	X
PBAT	-	X	X	-	-	-
PTMAT	-	X	X	-	X	-
PVA	X	X	X	-	X	X
PP, PE + aditiva	X	X	X	X	X	X
Škrob + PVA	X	X	X	X	X	-
Škrob + acetát celulózy	X	X	-	X	-	X

Zdroj: (Kroisová, 2009)

Biodegradovatelné materiály nachází díky svým vlastnostem široké spektrum použití v nejrůznějších průmyslových odvětvích. To je velmi dobře patrné na následujícím grafu, který znázorňuje procentuální podíly jednotlivých průmyslových aplikací z celkového množství vyrobených biodegradovatelných materiálů.

Biodegradovatelné materiály se používají po celém světě. Procentuální zastoupení jednotlivých kontinentů je znázorněno na Obr. 17. Vyšší zastoupení je v západním světě (západní Evropa, USA), nicméně i ve východní části světa začíná poptávka po biodegradovatelných materiálech stále stoupat. To je způsobeno zejména expanzí Číny na západní trh, který vyžaduje určitou míru ekologičnosti balení a s ní spojené používání biodegradovatelných obalů.

Globální spotřeba biodegradovatelných materiálů



Obr. 17 Globální spotřeba biodegradovatelných materiálů

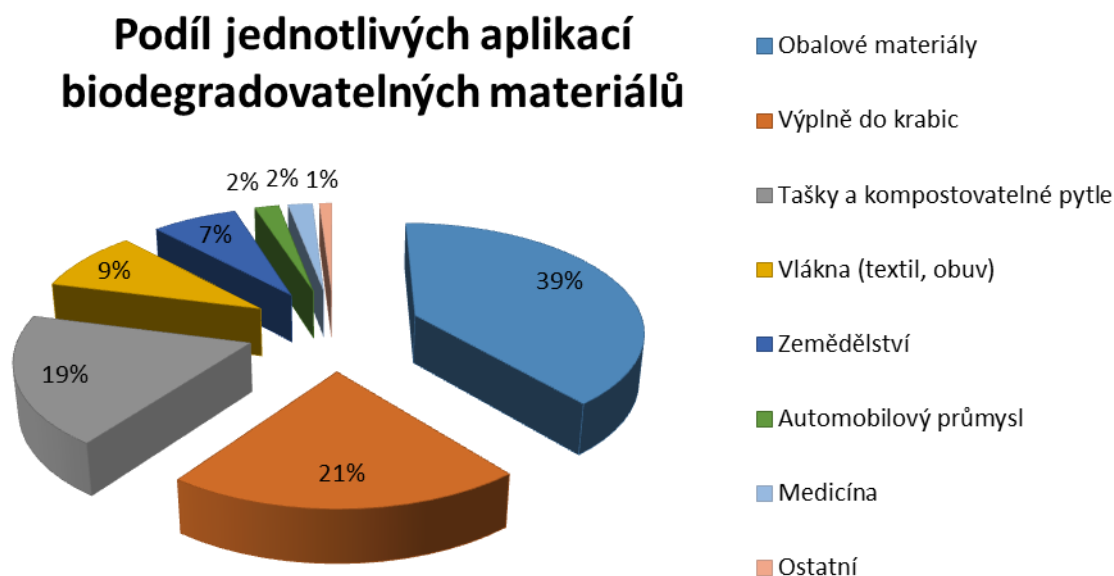
Zdroj: http://www.greenerpackage.com/bioplastics/biodegradable_polymers_market_grow_1_3_through_2014

Na Obr. 18 vidíme, že nejsilnější využití mají biodegradovatelné materiály v obalovém průmyslu a zemědělství. Stále větší procento pak zaujímá výroba vláken a to pro použita v kompozitech nebo jako nitě pro textilní a obuvnický průmysl. Menší procento pak mají minoritní aplikace – zejména v oblasti předmětů denní potřeby jako automobilový průmysl a ostatní drobné aplikace.

To je způsobeno tím, že největší poptávka po výrobcích z biodegradovatelných materiálů je právě tam, kde se předpokládá relativně krátká životnost produktu a kde je požadavek na jeho snadnou likvidaci.

Největší překážkou pro masivní rozvoj biodegradovatelných plastů je v dnešní době jejich cena. Ta je přibližně 2 – 6 x vyšší (dle konkrétního typu), než cena srovnatelného konvenčního plastu. Současný trend ve společnosti je ale používání bioplastů nakloněný.

Důkazem toho jsou marketingové strategie předních světových výrobců (v průřezu celou škálou zaměření), které jsou založeny právě na používání biodegradovatelných plastů.



Obr. 18 Podíl jednotlivých aplikací biodegradovatelných materiálů

Zdroj: <https://www.ihs.com/products/biodegradable-polymers-chemical-economics-handbook.html>

5.1 Obalový průmysl

Téměř 60 % z celkové produkce biodegradovatelných materiálů je zpracováno obalovým průmyslem. Toto číslo jen podtrhuje smysl existence degradovatelných bioplastů. Obalové materiály mají ochránit produkt před vlivy okolního prostředí až do chvíle spotřeby. Zároveň má obal i funkci marketingově-obchodní povahy. Má být takový, aby zaujal zákazníka, popř. zdůraznil či zpřístupnil požadované parametry zabaleného produktu. Například fólie, ve které je zabalené ovoce musí být opatřena líbivým potiskem, aby produkt oslovil spotřebitele, ale zároveň si musí zachovat průhlednost, aby spotřebitel na první pohled viděl, že ovoce je kvalitní a v dobré kondici viz. Obr. 19.



Obr. 19 Balení zeleniny s potiskem

Zdroj: http://cze.htech.cz/temp/gallery_slider_zoom_326.jpg

Po spotřebě resp. vybalení produktu životnost obalů končí a stávají se odpadem. Cílem by tedy mělo být použité obaly recyklovat nebo ekologicky zlikvidovat. A právě pro tento účel je proces biodegradace tím pravým řešením pro zachování udržitelného rozvoje.

V praxi se potom můžeme setkat s nejrůznějšími obaly, jejichž výchozí surovinou je biodegradovatelný polymer. V potravinářském průmyslu se jedná o nejrůznější fólie, tácky a sítě na maso, ovoce a zeleninu. Průhledné krabičky na prémiové produkty. Ekologické lahve na tekutiny vyrobené z PLA. Velké procento produktů pak tvoří i jednorázové tašky pro odnos nákupu domů. V poslední době se bioplasty uplatňují i pro výrobu jednorázových jídelních potřeb (talíře, příbory, šálky apod.) viz. obr. 20, 21 a 22.



Obr. 20 Jednorázové nádobí

Zdroj: <http://www.eko-plasty.cz/>



Obr. 21 Jednorázové jídelní potřeby

Zdroj: <http://naturesse.tracto.cz/fotografie/pribory-cpla-bioplast-bila-69-700.jpg>

Application	
Organic waste bags and shopping bags	
Mulch films	
Paper-coating	
Shrink film applications	
Foam packaging	
Thermoformed packaging	
Injection molding applications	

Obr. 22 Nejrůznější aplikace biodegradovatelného materiálu BASF Ecovio®

Zdroj: http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable_plastics/Ecovio_Brochure.pdf

Podobné produkty potom nalezneme i v balení nepotravinářského zboží – fólie, průhledné blistry, sáčky apod.

Velmi progresivně se rozvíjející komoditou jsou potom obalové materiály pro transport. Zde opět nalezneme fólie, ale i motouzy, protišokové výstelky do krabic (Obr. 23) pro citlivé výrobky či jednorázové plastové chrániče či mini palety.



Obr. 23 Protišoková výstelka do přepravních kartónů a její použití v praxi

Zdroj: http://www.multi-pak.pl/upload/art_gal/5_img1_400x160.jpg

5.2 Tašky a kompostovatelné pytle

Nezanedbatelný podíl, kolem 20 % z celkového množství produkce biodegradovatelných materiálů, směřuje do segmentu nákupních tašek a kompostovatelných pytlů. Více než tři čtvrtiny produkce v tomto segmentu směřuje do obchodních řetězců ve formě jednorázových nákupních tašek (Obr. 24). Tyto tašky se těší velké oblibě i přes to, že jsou zpoplatněny.



Obr. 24 Biodegradovatelná nákupní taška

Zdroj: http://www.bioplaneta.cz/files/mod_galerie/normal-41.jpg

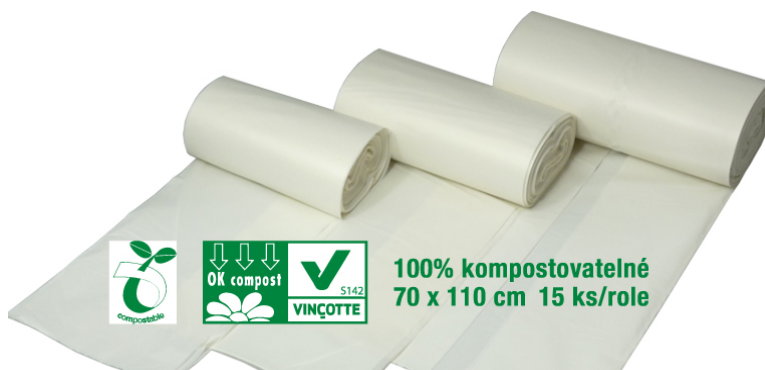
5.3 Zemědělství

V zemědělství si své místo biodegradovatelné materiály získaly zejména díky úspoře času a nákladů spojených se sběrem a likvidací odpadu z polí po sezoně. Hlavními produkty pro zemědělce jsou totiž mj. mulčovací filmy a fólie, které lze po skončení jejich životnosti jednoduše zaorat do brázdy, kde se následně samovolně rozloží – viz. obr. 25. Dalšími produkty, které těží z biodegradovatelnosti, jsou kontejnery a květníky, které lze při sázení plodin vkládat přímo do půdy, kde se samovolně působením přítomných mikroorganismů rozkládají. Užitečnými pomocníky pro podniky zabývající se rostlinnou výrobou jsou plně kompostovatelné vaky na svoz odpadu z výroby – viz. Obr. 26. V neposlední řadě jsou to pak i motouzy na bázi celulózy, kterými lze svazovat např. balíky sena či krmné slámy.



Obr. 25 PLA mulčovací fólie

Zdroj: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Mulch_Film_made_of_PLA-Blend_Bio-Flex.jpg



Obr. 26 Kompostovatelné vaky

Zdroj: http://www.shop-obaly.cz/images/40_4300.jpg

5.4 Ostatní aplikace

Mimo tradiční a hlavní průmyslové aplikace nacházejí své uplatnění biodegradovatelné materiály i v ostatních segmentech. Poměrně hojně zastoupeny jsou i mezi spotřebním zbožím jako jsou např. hygienické výrobky (vločky, pleny apod.) , nejrůznějších filtrech či oblečení (trička, ponožky, ložní prádlo atd.).

Velmi zajímavou aplikací je používání biodegradovatelných polymerů tam, kde je požadována 100% rozpustnost ve slané vodě. Tento speciálně modifikovaný polymer, používající jako svůj základ PVA, uvedli v roce 2012 japonští vývojáři. Cílem je tento materiál používat všude tam, kde hrozí, že použitý obal bude vhozen do moře (tedy ve všech ostrovních státech).

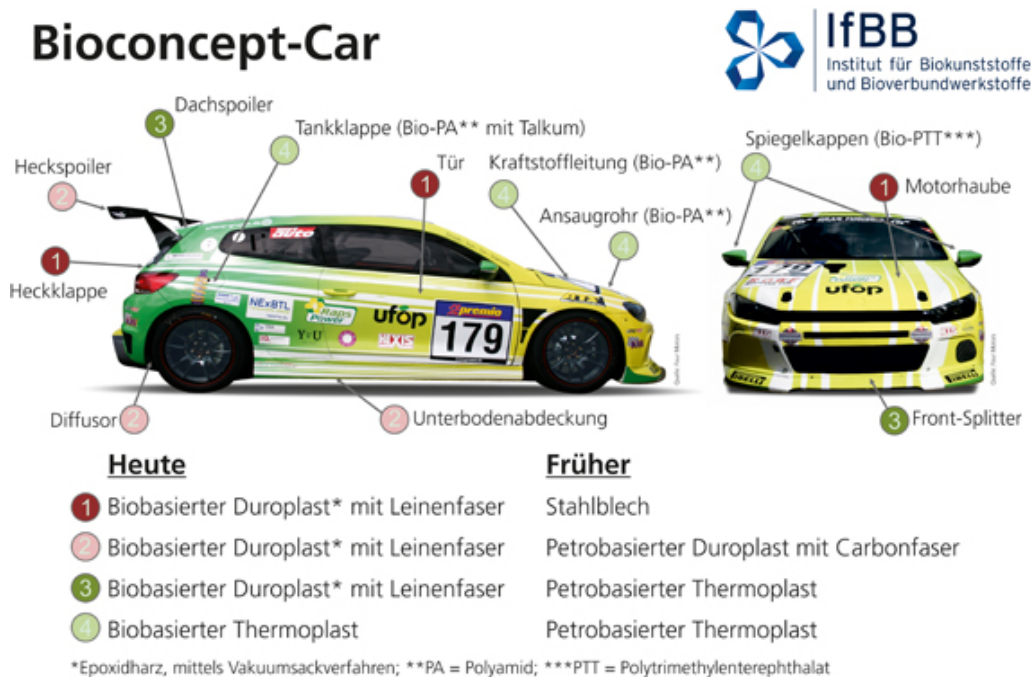
V poslední době se cestou bioplastů vydávají i přední výrobci hraček, kteří si na používání biodegradovatelných plastů staví svůj marketing. Stejně tak i firmy zabývající se produkty pro nejmenší se snaží nabízet zdraví neškodné produkty pro batolata vyrobené ze 100% biodegradovatelného plastu, kde výchozí suroviny jsou pouze na přírodní bázi.



Obr. 27 Příklad hraček pro nejmenší, které jsou vyrobeny ze 100% přírodního plastu
Zdroj: <http://www.biobaby.sk/kategoria/hracky/hracky-z-rastlinneho-bioplastu/stohovacia-hra/>

Z obdobného důvodu proniká tento trend i do automobilového průmyslu. Mnohé automobilky začaly nedávno uvádět, kolik procent z použitých plastů na voze jsou biodegradovatelné. Popularitu biodegradovatelným plastům mají přinést i různé projekty, které mají použití biodegradovatelných polymerů zpopularizovat.

Např. v roce 2011 - 2013 sestavil tým konstruktérů závodního týmu W&S Motorsport, který spolupracoval s vývojovým týmem z univerzity v německém Hannoveru, závodní vůz, jehož vnější karoserie a některé nosné prvky byly vyrobeny pouze z bioplastu. Projekt byl nazván Bioconcept-car (Scirocco project) viz. obr. 25.










Obr. 28 Projekt automobilu s maximálním možným využitím bioplastů

Zdroj: http://biowerkstoffe.fnr.de/fileadmin/_migrated/pics/Spinnengrafik-CRH_03_07_13_.jpg

5.5 Označení biodegradovatelných plastů

Aby měl spotřebitel šanci rozpoznat, že výrobek je vyroben z biodegradovatelných materiálů, jsou na obalech takovýchto výrobků uvedena jednotná loga. Tato loga signalizují, že výrobek splňuje evropské, americké či asijské normy ohledně parametrů biodegradace. Spotřebitel by pak podle těchto log, která jsou platná pro EU, měl být schopen poznat i to, jak má s výrobkem naložit po skončení jeho životnosti. Přehled těchto log najdeme v Tab. 7.

Tab. 7: Loga označující biodegradovatelný výrobek

Země resp. certifikační orgán	Logo
<p>USA – Biodegradable Products Institute</p> <p>American standard ASTM 6400</p>	
<p>Japanese standard</p> <p>GreenPla</p>	
<p>European standard EN 13432</p> <p>Australian standard AS 4736</p>	
<p>EU Vincotte EN 13432</p> <p>(pro průmyslové kompostování)</p>	
<p>EU Vincotte EN 13432</p> <p>(pro domácí kompostování)</p>	
<p>EU Vincotte EN 13432</p> <p>(zaručená degradovatelnost v půdě)</p>	
<p>EU Vincotte EN 13432</p> <p>(zaručená degradovatelnost ve vodě)</p>	

6. Závěr

Jako biodegradovatelný materiál lze označit takový materiál, který se při definovaných podmínkách (teplota, prostředí, tlak atd.) za enzymatického působení mikroorganismů (bakterie, houby či řasy) dokáže chemicky a mechanicky rozložit.

Označení biodegradovatelný plast bývá často zaměňováno s označením bioplast. Označení bioplast nám říká, že plast je vyrobený z čistě obnovitelných (přírodních) zdrojů, ale již nám neříká nic o jeho biodegradabilitě. Naproti tomu označení biodegradovatelný materiál nám říká, že tento plast je schopen se po skončení jeho životnosti rozložit. Biodegradovatelné polymery lze totiž vyrábět jak z čistě přírodních, plně obnovitelných zdrojů, tak i z fosilních surovin, popř. z kombinace těchto dvou základních typů surovin.

Biodegradovatelné materiály a rozsáhlá problematika okolo nich je téma velmi aktuální. Každý den chrlí továrny po celém světě tisíce tun surového plastu, ze kterého budou vyráběny nejrůznější plastové výrobky, bez kterých si již nikdo z nás nedovede představit běžný den. Všem těmto výrobkům ale dřív nebo později skončí životnost a stanou se odpadem.

Běžné konvenční plasty bohužel velmi často nemají dalšího využití a končí tak na skládkách nebo ve spalovnách. Biodegradovatelné materiály přinášejí do tohoto zažitého stereotypu určitou revoluci. Jsou schopny se po ukončení své životnosti za pomoci mikroorganismů v definovaných podmínkách rozložit zpět na oxid uhličitý, vodu a zbytkovou biomasu, kterou lze dále použít.

Při výrobě biodegradovatelných materiálů lze vycházet buď z čistě obnovitelných přírodních zdrojů, což jsou produkty z běžné rostlinné a živočišné výroby nebo ze speciálních provozů, které produkují surový plast za pomoci mikroorganismů a jejich speciálního zpracování, ale i ze zdrojů fosilních, tedy neobnovitelných. Díky moderním technologiím lze tyto zdroje navíc kombinovat a vytvářet tak směsi polymerů, jež ve výsledku mají požadované fyzikální i chemické parametry. Velmi důležitý je poznatek, že dnešní chemický průmysl dokáže suroviny pro výrobu biodegradovatelných materiálů dodatečně aditivovat tak, aby proces biodegradace začal až za přesně definovaných podmínek. To znamená, že je zaručen bezproblémový provoz výrobku po celou dobu jeho životnosti.

Vlastnosti biodegradovatelných materiálů a konvenčních plastů lze velmi dobře porovnávat. Z porovnání vychází, že tyto materiály si jsou svými vlastnostmi velmi podobné a běžný uživatel v podstatě nepozná rozdíl. Díky tomu se biodegradovatelné materiály používají ve velmi širokém spektru aplikací.

Limitujícím faktorem pro jejich masovější výrobu a rozšíření je potom jejich cena, která je ve srovnání s konvenčními plasty 2 – 10ti násobná. Tento handicap ale velmi účinně potlačuje marketingová lobby předních světových výrobců, která klade velký důraz na ekologii a možnost biodegradace jejich výrobků nebo jejich částí. V západní civilizaci jsou témata ekologie a péče o životní prostředí velmi skloňovanými pojmy. To je taky jeden z hlavních hnacích motorů pro rozvoj výroby a použití biodegradovatelných materiálů po celém světě.

Kombinace uvědomělých spotřebitelů a přívětivé legislativy, která by např. daňově zvýhodňovala výrobky vyrobené či zabalené v obalech z biodegradovatelných materiálů, by mohla ještě více podpořit jejich rozšíření.

Biodegradovatelné materiály lze bez nadsázky označit za materiály budoucnosti, které by mohly účinně pomoci bojovat s hromadícími se plastovými odpady, jichž každý rok přibývají miliony tun po celém světě.

7. Seznam použité literatury

1. BĚHÁLEK L., Polymery [online], Svitavy 2015, ISBN 978-80-88058-68-7 [citováno 16.2.2016]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
2. DUCHÁČEK V. Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006, 280 s., ISBN 80-7080-617-6
3. FIALA J., Sborník z II. Mezinárodní konference BIOLOGICKY ROZLOŽITELNÉ ODPADY, jejich zpracování a využití v zemědělské a komunální praxi, ZERA, Náměšť nad Oslavou 2006, 134 s., ISBN 80-903548-1-5
4. FILIP J., Komunální odpad a skládkování, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno 2006, 128 s., ISBN 80-7157-712-X
5. FILIP J., Odpadové hospodářství, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno 2002, 118 s., ISBN 80-7157-608-X
6. KOLEKTIV, Co je kolagen? [online], Firmam.cz, 2016, [citováno 25.1.2016]. Dostupné z: <http://www.kolageny.cz/co-je-kolagen>
7. KOLEKTIV, Nakládání s bioodpady v legislativě a praxi, Vodní zdroje EKOMONITOR spol. s.r.o., Chrudim 2008, 88 s., ISBN 978-80-86832-33-3
8. KOLEKTIV, PLA – biopolymer polylaktická kyselina [online], RESINEX Group, Czech Republic, 2016, [citováno 25.1.2016]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pla.html>
9. KONVALINA P., Škrob – odlepidla po céděčka [online], Ekolist.cz Praha, 2006, [citováno 11.2.2016]. Dostupné z : <http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/skrob-od-lepidel-po-cedecka>
10. KROISOVÁ D., Biodegradovatelné polymery – úvod do problematiky, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2009, 78 s., ISBN 978-80-7372-468-9

11. MALAŤÁK J., Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství – zpracování biologicky rozložitelných odpadů, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha 2008, 180 s., ISBN 978-80-213-1747-5
12. MAREK M., Odpady a druhotné suroviny v zemědělsko-potravinářském komplexu, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 1996, 125 s., ISBN 80-7078-382-6
13. MERNA J., Polymery – úvod [online], Ústav polymerů VŠCHT Praha, 2007, [citováno 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.merna.eu/MMC/Polymery-uvod.pdf>
14. MITTAL, V. Optimization of polymer nanocomposite properties. Weinheim: Wiley-VCH, 2010, 418 s. ISBN 35-273-2521-2.
15. PETRUŠ J., Kyselina polymléčná nejen jako biodegradabilní polymer [online], Chempoint – větci pro průmysl a praxi, 2011, [citováno 30.1.2016]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kyselina-polymlecna-nejen-jako-biodegradabilni-polymer>
16. RHIM, J. - W., K. W PERRY, Natural Biopolymer-Based Nanocomposite Films for Packaging Applications., Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2007, č. 47, s. 411-433, ISSN 1040-8398
17. SMEJTKOVÁ A., Obaly a obalová technika, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha 2004, 126 s., ISBN 80-213-1315-3
18. SUSHEEL K., AVÉROUS L., Biopolymers: Biomedical And Environmental Applications, John Wiley & Scrivener Pub., 2011, 642 s., ISBN 978047063923
19. VÁŇA J., Pevné odpady, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha 2009, 190 s., ISBN 978-80-213-1992-9
20. VOLEK V., Obaly vyrobené z obnovitelných zdrojů a související problematika, [online] Envikongres, Brno 2006 [citováno 20.1.2016]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9738840-Obaly-vyrobene-z-obnovitelnych-zdroju-a-souvisejici-problematika.html>

8. Seznam obrázků, tabulek a použitých zkratk

Seznam obrázků

Obr. 1	Základní rozdělení plastů.....	3
Obr. 2	Rozdělení biodegradovatelných polymerů z hlediska výchozí suroviny.....	4
Obr. 3	Vzorec celulózy	5
Obr. 4	Molekula škrobu	6
Obr. 5	Molekula chitinu a chitosanu	8
Obr. 6	Ilustrační obrázek proteinu	9
Obr. 7	Strukturální vzorec kolagenu	10
Obr. 8	Obecné schéma polyhydroxyalkanoátů	12
Obr. 9	Schéma vzniku PLA	13
Obr. 10	Vzorec molekuly PGA	16
Obr. 11	Vzorec molekuly PCL.....	17
Obr. 12	Vzorec molekuly PET	18
Obr. 13	Obecná termomechanická křivka.....	20
Obr. 14	Deformační křivka polymeru	21
Obr. 15	Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku	21
Obr. 16	Typická deformační křivka pro semikrystalické termoplasty.....	22
Obr. 17	Globální spotřeba biodegradovatelných materiálů.....	27
Obr. 18	Podíl jednotlivých aplikací biodegradovatelných materiálů	28
Obr. 19	Balení zeleniny s potiskem.....	29
Obr. 20	Jednorázové nádoby.....	30
Obr. 21	Jednorázové jídelní potřeby	30
Obr. 22	Nejrůznější aplikace biodegradovatelného materiálu BASF Ecovio®	30
Obr. 23	Protišoková výstelka do přepravních kartónů a její použití v praxi.....	31
Obr. 24	Biodegradovatelná nákupní taška.....	31
Obr. 25	PLA mulčovací fólie	32
Obr. 26	Kompostovatelné vaky	32
Obr. 27	Příklad hraček pro nejmenší, které jsou vyrobeny ze 100% přírodního plastu..	33
Obr. 28	Projekt automobilu s maximálním možným využitím bioplastů	34

Seznam tabulek

Tab. 1:	Výnos amylózy z typických plodin pro ČR	7
Tab. 2:	Biodegradovatelné polyestery	15
Tab. 3:	Hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických parametrů některých komerčních syntetických polymerů.....	23
Tab. 4:	Hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických parametrů některých komerčních biodegradovatelných polymerů	24
Tab. 5:	Přehled obecných vlastností biodegradovatelných polymerů	25
Tab. 6:	Možnosti zpracování nejrozšířenějších biopolymerů.....	26
Tab. 7:	Loga označující biodegradovatelný výrobek	35

Seznam použitých zkratk

CO ₂	oxid uhličitý
ČR	Česká republika
E	modul pružnosti v tahu
E _t	modul pružnosti v tahu polymerů
EU	evropská unie
F	síla
F _{max}	největší síla
H ₂ O	voda
CH ₄	metan
Obr.	obrázek
PA6	silon
PBS	polybutylensukcinát
PBSA	polybutylensukcinát adipát
PBST	polybutylen sukcinát tereftalát
PBT	polybutylentereftalát
PC	polykarbonát
PCL	polykaprolakton
PE	polyetylen
PEA	polyesteramid
PE-LD	polyetylen s nízkou hustotou

PET	polyetylentereftalát
PETP	polyethylentereftalát
PGA	kyselina polyglykolová
PHA	polyhydroxybutyrát
PHB	polyhydroxyalkanoát
PHB-PHV	kyselina polyhydroxymásečná - polyhydroxvalerová
PHBV	polyhydroxybutyrát-valerát
PHV	polyhydroxyvalerát
PLA	kyselina polylaktidová (polymléčná)
POM	polyoxymetylén
PP	polypropylen
PPO	polyfenylenoxid
PS	polystyren
PTMAT	polytetramethylen adipát tereftalát
PVA	polyvinylalkohol
PVCC	polyvinylchlorid nachlorovaný
Tab.	tabulka
T_f	teplota tečení
T_g	teplota skelného přechodu
T_m	teplota tání
USA	United States of America
ε	relativní deformace
σ	napětí v tahu
σ_b	napětí při přetržení
σ_m	napětí na mezi pevnosti
σ_y	napětí na mezi kluzu