



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra agroekosystémů

Bakalářská práce

**Možnosti využití mikroorganismů pro rozklad plastového
odpadu**

Autorka práce: Pavlína Heřmanová

Vedoucí práce: Perná Kristýna Mgr. Ing. Ph.D.

České Budějovice
2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracovala pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....
Podpis

Abstrakt

Heřmanová, P. Možnosti využití mikroorganismů pro rozklad plastového odpadu. České Budějovice, 2023. Bakalářská práce na zemědělské fakultě Jihočeské univerzity. Vedoucí práce Kristýna Perná Mgr. Ing. Ph.D.

Tato práce se zabývá možnostmi biodegradace plastů pomocí mikroorganismů. Je zde popsána výroba nejpoužívanějších plastů a jejich využití, dále se zabývám plastovým odpadem a jeho únikem do životního prostředí. Pozornost je věnována mikroorganismům a jejich enzymům, které jsou schopny biodegradovat plasty a dále jsou zhodnoceny metody používané při hodnocení průběhu biodegradace.

Klíčová slova: biodegradace, plasty, mikroorganismy, enzymy, bakterie, životní prostředí, polymer

Abstract

Heřmanová, P. Possibilities of using microorganisms for the decomposition of plastic waste.. České Budějovice, 2023. Bachelor Thesis at Faculty of Agriculture and Technology of University of South Bohemian. Thesis Supervisor Kristýna Perná Mgr. Ing. Ph.D.

This work deals with possibilities of biodegradation of plastics using microorganisms. The production of the most used plastics and their use is described here, and I also deal with plastic waste and its leakage into the environment. Attention is paid to microorganisms and their enzymes, which are capable of biodegrading plastics, and the methods used in evaluating the course of biodegradation are further evaluated.

Keywords: biodegradation, plastics, microorganisms, enzymes, bacteria, environment, polymer

Poděkování

Děkuji vedoucí mé bakalářské práce, Kristýně Perné Mgr. Ing. Ph.D. za odbornou pomoc a ochotu, která mi byla poskytnuta během zpracování této práce. Dále děkuji mé rodině a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

Úvod.....	7
1 Plasty.....	9
1.1 Výroba plastů.....	10
1.2 Přehled nejvýznamnějších plastů	11
1.3 Produkce plastů	14
1.4 Historie produkce plastů.....	15
2 Polymery	17
2.1 Rozdělení polymerů.....	17
2.2 Historie polymerů.....	17
2.3 Syntetické polymery	18
2.4 Přírodní polymery.....	18
2.4.1 Přírodní kaučuk	18
2.4.2 Celulóza.....	19
2.4.3 Škrob	19
2.4.4 Lignin	20
2.4.5 Bílkoviny.....	20
2.4.6 Chitin a chitosan.....	20
3 Plastový odpad	21
3.1 Produkce plastového odpadu.....	21
3.2 Plastový odpad v oceánech.....	22
3.3 Mikroplasty.....	24
3.4 Vnik mikroplastů do potravních řetězců	25
3.5 Nanoplasty.....	26
3.6 Vliv mikroplastů a nanoplastů na lidské zdraví	27
4 Biodegradace.....	29

4.1	Degradace polymerů.....	29
4.1.1	Fotodegradace	29
4.1.2	Chemodegradace	30
4.1.3	Termodegradace	30
4.2	Biologicky odbouratelné polymery	30
4.2.1	Polyethylen.....	30
4.2.2	Polypropylen	31
4.2.3	Polystyren.....	31
4.2.4	Polyvinylchlorid.....	31
4.2.5	Polyethylentereftalát	31
4.3	Průběh biodegradace	31
4.3.1	Aerobní biodegradace	32
4.3.2	Anaerobní biodegradace.....	32
4.3.3	Mineralizace	32
4.4	Faktory ovlivňující biodegradaci.....	34
4.5	Organismy degradující syntetické polymery	34
4.5.1	Houby.....	36
4.5.2	Bakterie	37
4.6	Metody hodnocení biodegradace.....	37
4.6.1	FTIR metoda	37
4.6.2	Metoda úbytku	38
4.6.3	SEM analýza	38
	Závěr	39
	Seznam použité literatury.....	40
	Seznam obrázků	50
	Seznam tabulek	51
	Seznam použitých zkratk.....	52

Úvod

V minulém století došlo k velkým pokrokům v oblasti vědy a techniky, a to přispělo ke kvalitě a pohodlí našich životů, které se velmi liší od životů předchozích generací. Přírodní látky, sklo, kovy a keramika se nahradily nově vyvinutými syntetickými látkami, plasty. Plastové materiály se začaly využívat ve velkém, a to z důvodu jejich všestrannosti a levnosti. Postupem let se produkce plastů rapidně zvyšovala a s produkcí plastů se zvyšovala i produkce plastového odpadu, který je v současné době velmi diskutovaným a medializovaným tématem.

Míra kumulace plastového odpadu v životním prostředí každým rokem stoupá a stává se globálním problémem. Plast se hromadí na souši i v oceánech a ohrožuje funkci ekosystémů. Dle nejnovějších studií, nebyl dosud vynalezen způsob, jak se trvale zbavit plastů a neohrozit životní prostředí.

Tato práce je rozdělena do čtyř kapitol. V první kapitole popisují plasty, jejich rozdělení, vlastnosti a dále se zabývám problematikou spojenou s plastovým odpadem a jeho únikem do životního prostředí. V druhé kapitole se zabývám polymery, jejich vlastnostmi a rozdělením. Třetí kapitola je věnována plastovému odpadu, následuje poslední kapitola na téma biodegradace, na kterou je v této práci kladen největší důraz. Práce je psána formou rešerše a jsou v ní zahrnuty výzkumy, které byly do současnosti publikovány.

Cíl práce

Cílem práce je vytvořit přehled nejpoužívanějších plastů a jejich aplikaci, dále shrnout dosavadní poznatky o mikrobiálním rozkladu plastového odpadu, zahrnující degra-dační procesy, průběh biodegradace a souhrn organismů, které degradují plastový odpad.

1 Plasty

Slovo plast pochází z řeckého „plastikos“, v překladu do českého jazyka jako „tvárný“. Plastické hmoty jsou produkty vykazující mimořádné vlastnosti, jejich trvanlivost a odolnost vůči faktorům působícím na jejich degradaci jsou v porovnání s přírodními materiály mnohem vyšší. Jsou jedinečné svou ohebností (plasticitou), pružností, tvrdostí, nízkou hustotou, dobrou až velmi dobrou elektrickou izolační schopností, jsou bez zápachu a bez chuti, z toho důvodu lze pro plastické hmoty najít využití téměř na cokoliv. (1,2)

Plastické hmoty představují skupinu materiálů, jejichž význam je pro techniku a každého jednotlivce větší, než se všeobecně předpokládá. Plasty jsou materiály, které zhruba před 80 lety neexistovaly. Začaly se využívat až po druhé světové válce. Přírodní materiály se vyměnily za materiály umělé. V porovnání s o mnoho let starším a známým materiálem jako je například hliník, olovo, zinek, sklo, keramika, dřevo a mnohé jiné, převýšila výroba plastů veškerý materiál v neporovnatelném měřítku. (1,2)

Plasty jsou důležitou složkou moderní společnosti. Žijeme v době, ve které bychom si těžko mohli představit život bez nich, většina věcí kolem nás je vyrobena z plastů nebo obsahuje prvky syntetických látek. Plasty umožňují výrobu oblečení, nábytku, zdravotnických potřeb apod. Používají se jako obaly na jídlo a zajišťují dodávku pitné vody v lahvích. Z plastů jsou vyrobeny části letadel a aut. Díky produktům vyrobených z plastických hmot se stal náš život kvalitnějším. Díky své všestrannosti a nízké relativní ceně se plasty používají ve všech průmyslových odvětvích. V celosvětové prvovýrobě plastů dominují obaly, druhým největším sektorem je stavebnictví a následuje textilní sektor. Textilní sektor je zodpovědný za téměř veškerou produkci syntetických vláken (polyester, nylon, akryl). (3)

S produkcí plastu stoupá i produkce plastového odpadu. Plastový odpad je nyní v životním prostředí tak všudypřítomný, že byl navržen jako geologický indikátor navrhované éry antropocénu. Rok 1950 je navržen jako počátek navrhované éry, jedná se o období, ve kterém mnoho povrchových geologických procesů začalo být ovládáno lidmi. (4,5)

1.1 Výroba plastů

Plasty jsou z chemického hlediska skupiny materiálů tvořeny makromolekulárními látkami syntetického nebo přírodního původu. Plast je termín obvykle používaný pro uměle vyrobené polymery. Polymer je molekula sestávající z mnoha stejných nebo podobných podjednotek spojených dohromady. (6)

Dnes se plasty vyrábějí derivací zemního plynu a ropy. Odhaduje se, že 8 % světové produkce ropy je využito na výrobu plastů. V tomto procesu jsou biomolekuly chemicky a fyzikálně restrukturalizovány za vzniku polymerů. Proces výroby plastů je významným zdrojem skleníkových plynů. Většina plastů je vyrobena z polymerů uhlíku s dusíkem, vodíkem, křemíkem, sírou, chlorem a kyslíkem. Polymery vznikají ze třech základních chemických reakcí, syntetizují se pomocí polymerace, polykondenzace a polyadice. (6,7)

Polymerace

Při polymeraci se spojují molekuly s dvojnou nebo trojnou vazbou bez vzniku vedlejšího produktu. Z nízkomolekulární látky (monomeru) – styren, ethen, vznikají látky makromolekulární (polymery) – polystyren, polyethylen. Polymerací se dále syntetizuje polypropylen a polyvinylchlorid. (1,2)

Polykondenzace

Řadí se mezi stupňovité chemické reakce, obdobně jako u polymerace se spojují monomery do řetězců, ale na rozdíl od polymerace vznikají vedlejší produkty. Polykondenzací se syntetizuje polyamid (PA) a polyestery (PES). (1,2)

Polyadice

V průběhu reakce spolu reagují dva monomery, které jsou odlišné a dochází u nich k přesunu atomu vodíku z jednoho monomeru na monomer druhý. Mezi nejznámější plasty syntetizované polyadicí patří polyuretan (PUR). (1,2)

1.2 Přehled nejvýznamnějších plastů

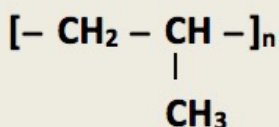
Plasty se dělí do třech hlavních skupin. Tyto skupiny zahrnují termoplasty, termosety a elastomery. Elastomery vynikají svou pružností a stabilitou. Termoplasty jsou plasty, které se při zahřátí taví a při ochlazení tvrdnou, díky těmto vlastnostem jsou termoplasty recyklovatelné. Příklady termoplastů jsou Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylentereftalát (PET), Polystyren (PS), Polyamid (PA). Zástupci termosetů jsou Polyuretan (PUR), silikon a melaminové, fenolové a akrylové pryskyřice, na rozdíl od termoplastů, termosety po zahřátí tuhnou a dále je nelze tvarovat. V Tabulce č. 1. je přehled nejvyžívanějších plastů, jejich zkratky a využití. (1,2,6)

Tab. č. 1: Přehled nejvýznamnějších druhů plastů

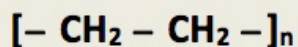
Materiál	Zkratka	Základní látka	Nejvýznamnější využití
Polypropylen	PP	Propen	Součástky do aut
Polyethylen	PE	Ethenu	Obalový materiál
Polyvinylchlorid	PVC	Vinylchlorid	Stavebnictví
Polystyren	PS	Styren	Tepelný izolátor
Polyethylentereftalát	PET	Ethylenglykol a Kyselina tereftalová	Nápojové láhve

Polypropylen (PP)

PP (Obr. č. 1) byl objeven v roce 1954 a rychle vzrostl na popularitě. PP je petrochemický produkt, který je odvozen od olefinového monomeru propylenu. Ze všech komoditních plastů má nejnižší hustotu. Patří mezi termoplasty, jedná se o nepolární plast, je odolný vůči kyselinám, zásadám a solím a polárním rozpouštědlům. Je to hořlavý plast a je méně odolný vůči mrazům. Využití polypropylenu je například při výrobě obalových materiálů, využívá se při výrobě vláken pro koberce. Vyrábějí se z něho díly do injekčních stříkaček a může být využíván pro výrobu součástek do aut, vyrábějí se z něj provazy a lana. Je pevnější než PE a pro jeho široké využití je nejvyráběnějším termoplastem na světě. (8,9,10,11)



Obr. č. 1. Chemický vzorec PP



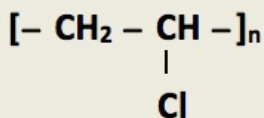
Obr. č. 2. Chemický vzorec PE

Polyethylen (PE)

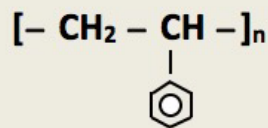
Polyethylen (Obr. č. 2) byl poprvé syntetizován v roce 1898, v roce 1939 byla zahájena jeho průmyslová výroba. Rozlišují se dva základní druhy, a to s vysokou hustotou (PE-HD) a s nízkou hustotou (PE-LD). PE je termoplast a vzniká polymerací ethenu, je nepolární, tedy nenavlhavý. Má skvělé elektrizační schopnosti. Ze všech termoplastů je nejméně pevný. Je velmi citlivý na UV záření a je velice hořlavý. Polyethylen se používá nejvíce jako obalový materiál, dále se využívá na výrobu tašek, pytlů, hadic a lahvíček. Dále je využíván ve zdravotnictví při výrobě umělých cév. (1,2)

Polyvinylchlorid (PVC)

PVC (Obr. č. 3) byl poprvé syntetizován v roce 1872, komerčně vyráběn byl až v 20. letech 20. století v USA. Patří mezi amorfní termoplasty, je pevný a tuhý a vyrábí se z vinylchloridu. Využívá se při výrobě pláštěnek, deštníků, rukavic, umělých kožešin, záchodových prkének a hraček, dále se využívá ve stavebnictví. Je prokazatelné, že PVC uvolňuje toxické látky, které ohrožují lidské zdraví. (1,2)



Obr. č. 3. Chemický vzorec PVC



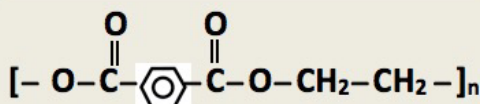
Obr. č. 4. Chemický vzorec PS

Polystyren (PS)

Monomer styren objevil v roce 1839 lékárník Eduard Simon. Jedná se o amorfní termoplast, za běžných podmínek je pevný a křehký. Vzniká polymerací styrenu. Polystyrenové plasty se dělí na standartní polystyren (PS, viz Obr. č. 4), expandovatelný polystyren (EPS) a houževnatý polystyren (HIPS). Je hořlavý a odolný vůči oxidaci. Výhodou polystyrenu je jeho dobrá opracovatelnost a nevýhodou je křehkost, proto se aplikuje pro výrobu produktů jako jsou kelímky na nápoje, obaly na CD, velké využití má ve stavebnictví jako tepelný a zvukový izolátor. (1,2)

Polyethylentereftalát (PET)

V roce 1941 byl PET (Obr. č. 5) patentován. Patří k termoplastům a řadí se do skupiny polyesterů. PET se vyrábí dvěma způsoby, prvním způsobem je esterifikace ethylen-glykolu a kyseliny tereftalové. Druhým způsobem výroby je takzvaný dvoufázový dimethyltereftalátový proces. Má vysokou propustnost pro světlo. Nejčastěji ho vidíme v podobě nápojových láhví, které se začaly poprvé vyrábět v roce 1978, byla do nich plněna Coca-Cola. Další využití má především pro výrobu vláken, které se zpracovávají pro výrobu textilu. (1,2)



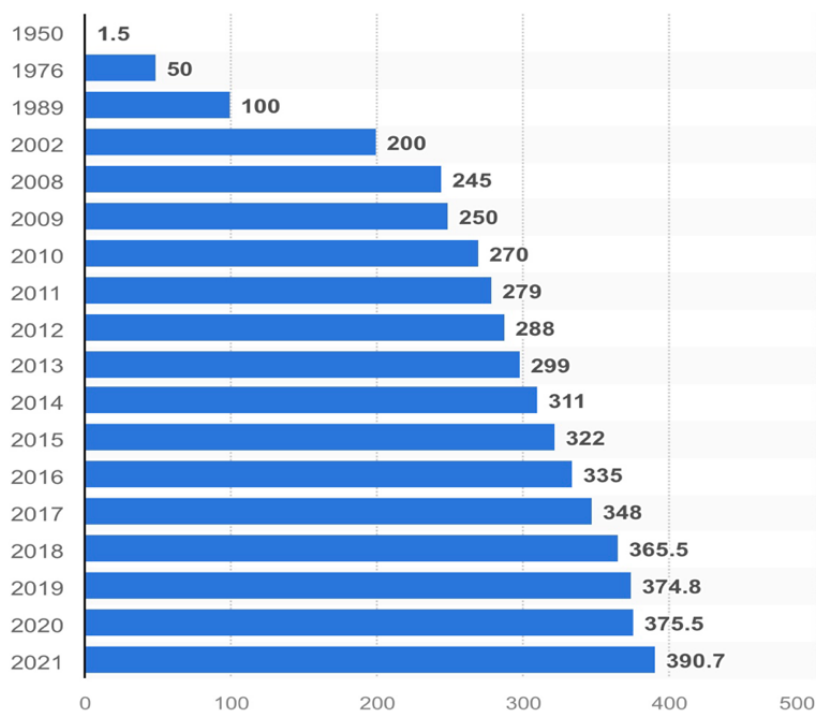
Obr. č. 5. Chemický vzorec PET

1.3 Produkce plastů

Produkce plastů se každým rokem prokazatelně zvyšuje a nelze zcela určit vyprodukovaný roční objem plastů v globálním měřítku.

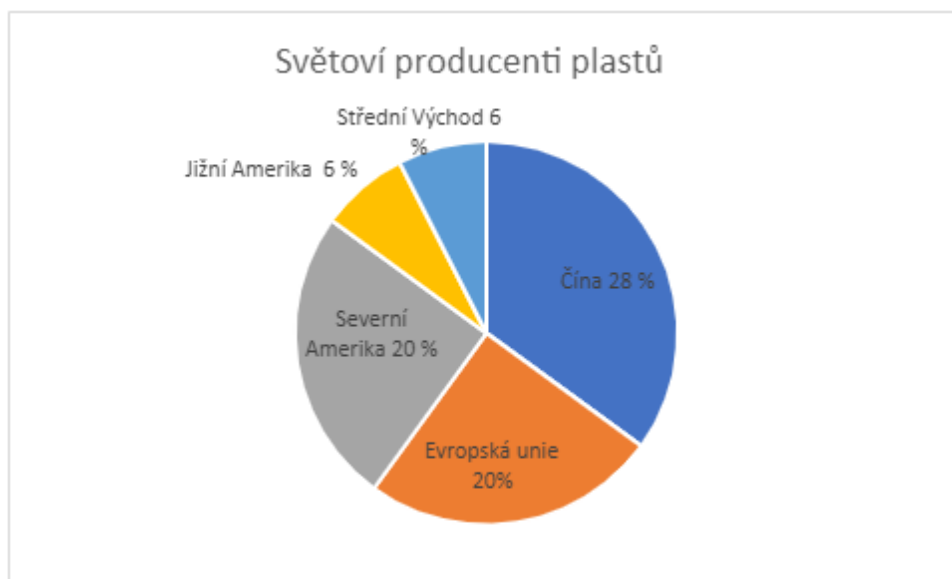
Mezi 70. a 90. lety 20. století došlo k vysokému nárůstu produkce plastů, jeho produkce se téměř ztrojnásobila (viz Obr. č. 6). Obdobný trend nárůstu produkce plastů následuje až do dnešní doby. Podle skupiny PlasticsEurope Market Research Group dosáhla celosvětová produkce plastů v roce 2019 zhruba 368 miliónů tun. Tento údaj zahrnuje všechny typy plastů, včetně termoplastů, elastomerů a termosetových plastů. Očekává se, že vzhledem k rostoucímu využití plastů v různých sektorech, se produkce během 20 let zdvojnásobí a do roku 2050 se téměř zčtyřnásobí. (12)

V některých studiích se odhaduje, že pokud bude trend posledních let pokračovat, celosvětová roční primární produkce plastů by v roce 2050 dosáhla 1100 miliónů tun. S rostoucí produkcí plastů roste i produkce plastového odpadu. Pokud budeme pokračovat v znečišťování moří, odhaduje se, že tímto způsobem přesáhne do roku 2050 množství plastu v oceánech množství ryb. (13,14)



Obr. č. 6. Celosvětová roční produkce plastů od roku 1950 do roku 2021 v milionech tun (zdroj: <https://www.statista.com/>)

Geyer et al. (2017; 15) ve své studii uvádějí, že Čína vyprodukuje 28 % celosvětového množství plastů, následuje Evropská unie a Severní Amerika po 20 % celosvětové produkce a Jižní Amerika a Střední Východ každá s 6 % produkce (viz Graf č. 1).



Graf. č. 1: Světoví producenti plastů

Výroba plastů dosáhla celosvětově významné úrovně, přičemž Čína, Evropa a Severní Amerika jsou hlavními producenty. Značná část plastů končí jako odpad a míra recyklace je nízká, což zdůrazňuje potřebu inovativních řešení ke snížení dopadu výroby a spotřeby plastů na životní prostředí, proto je zásadní, aby korporace i jednotlivci podporovali udržitelné alternativy. (15)

1.4 Historie produkce plastů

První plastový materiál byl vyroben v roce 1862. Vytvořil ho Američan John Wesley Hyatt a v roce 1870 si ho nechal patentovat. Vytvořil látku, která byla pružná, pevná, odolná vůči vodě a kyselinám a dala se tvarovat. Tato látka byla revoluční a na ní navázal v roce 1907 Leo Hendrik Baekeland, který vytvořil bakelit. Bakelit je fenol-formaldehydový polykondenzát (pryskyřice). Tento syntetický polymer měl využití v domácnostech (kryty rádií, hračky, krabičky). Byl vynalezen, aby nahradil slonovinu a hedvábí, tyto zdroje byly dříve často nedostupné a drahé. Komerční vývoj tohoto syntetického polymeru je považován za počátek éry plastikářského průmyslu. (7,16)

Později po vynálezu bakelitu byl syntetizován PVC, který byl poprvé používán ve 20. letech minulého století. (7,16)

Začátek plastové revoluce nastal během 2. světové války kolem roku 1938 s vynálezem nylonu, který patří mezi polyamidy. Polyamidové vlákno vyniká svou pružností a odolností, používal se jako náhražka hedvábí používaného na výrobu padáků. Vzrostla také poptávka po lékařských předmětech. (7,11,16)

Skutečný vývoj nových syntetických látek nastal v 50. a 60. letech 20. století. Do roku 1950 dosáhla celosvětová roční produkce plastů dvou milionů metrických tun. Rok 1950 se často uvádí jako počáteční rok výroby plastů. V té době se s problémy souvisejícími s plastovým odpadem lidé příliš nezabývali, přestože veřejnost si byla vědoma problémů životního prostředí již v 60. letech, kdy byla vydána kniha *Silent Spring* americké spisovatelky a biologky Rachel Carson v roce 1962. V porovnání s dnešní produkcí plastů se tehdy vyrábělo jen malé množství plastů a díky tomu byl plastový odpad relativně zvládnutelný. (7,16)

Od 70. let 20. století rostla produkce plastů rychleji než výroba jakéhokoliv jiného materiálu a produkce se více než ztrojnásobila, což odráží podobný nárůst produkce plastového odpadu. Na počátku roku 2000 vzrostlo množství plastového odpadu, který byl vyprodukován za jedno desetiletí více než za předchozích 40 let. (7,16)

2 Polymery

Předpona „poly-“, pramení z řeckého slova a znamená „mnoho“ nebo „více“. Opakující se jednotky řetězců nazýváme mery. Pojem polymer je velmi široký, lze ho definovat jako látku, ve které se nachází opakující se a navzájem vázané jednotky. Polymery jsou výjimečné tím, že mají velké molekuly, které nazýváme makromolekuly, které tvoří řetězce a jejich základní jednotka se v nich opakuje. Makromolekulární délku můžeme vyjádřit molární hmotností. Pokud má sloučenina vyšší molární hmotnost než 10^3 g/mol, považuje se látka za makromolekulární, v případě molární hmotnosti vyšší než 10^4 g/mol se jedná o polymery. (1,2)

2.1 Rozdělení polymerů

Polymery lze rozdělovat podle původu. Přírodní polymery se získávají z biomasy, zatímco syntetický polymer vzniká z fosilních zdrojů především z ropy, zemního plynu, uhlí a zemního vosku. Dalším základní dělení polymerů je na elastomery a plasty. Zástupci elastomerů jsou kaučuky, z kterých se vyrábí pryže, elastomer vyniká svou elasticitou, který lze malou silou deformovat bez narušení. Druhou skupinou polymerů jsou plasty, které jsou běžně tvrdé, mohou být i křehké. (1,2)

2.2 Historie polymerů

Přírodní materiály používali lidé tisíce let, již od roku 1496 se využíval biopolymer kaučuk, známý jako přírodní guma. První komerčně využívaný přírodní polymer byla gutaperča, v roce 1848 byla použita jako izolant podmořských telegrafních kabelů. Slonovina a bavlna se v minulém století staly nedostatkovým zbožím a lidé se snažili nahradit přírodní materiály jinými dostupnějšími materiály, které budou vynikat stejnými vlastnostmi. Výroba a rozvoj syntetických polymerů začaly až ve 20. století. Rozvoj byl motivován potřebou izolantů v elektrotechnickém průmyslu, pro izolaci se používalo sklo, mramor nebo voskovaný papír. (7,16)

2.3 Syntetické polymery

Syntetické polymery představují skupinu makromolekulárních látek, které nelze získat z přírodních zdrojů, a vyrábějí se umělou cestou. Cílem bylo získat polymery, které mají vlastnosti biopolymerů. Velká většina syntetických polymerů má dnes lepší vlastnosti než polymery přírodní. Syntetické polymery jsou využívány ve všech oborech. Umělé polymery se vyrábějí polyreakcemi. Jako každá uměle vytvořená látka, mají i syntetické polymery své výhody a nevýhody. Mezi jejich výhody patří nízká hustota, což má za následek nižší hmotnost výrobků (např. dopravní prostředky díky tomu překonají větší vzdálenosti). Mezi jejich další výhody patří dobrá tepelná a elektrická izolace, chemická odolnost a snadná zpracovatelnost. Nevýhodou syntetických polymerů je jejich hořlavost, nízká odolnost při UV záření a vysoká teplotní roztažnost. (1,2)

2.4 Přírodní polymery

Přírodní polymery pocházejí z přírodních zdrojů, často se označují jako biopolymery. Vzhledem ke stavbě jejich řetězce, ve kterém se objevuje dusík a kyslík, jsou přírodní polymery lépe biologicky odbouratelné než polymery syntetické. Přírodní polymery lze rozlišovat ze dvou hledisek, a to dle původu polymeru a dle jeho biodegradovatelnosti. (17,18,19)

2.4.1 Přírodní kaučuk

Kaučuk patří mezi nejznámější přírodní gumy. První zmínka o kaučuku byla po objevení Ameriky. Kaučuk se získává ze stromu *Hevea brasiliensis*, který se nachází především v Asii, Indonésii a v Malajsii. Vyskytuje se v kůře v podobě latexu (bílá kapalina). Ze stromu se kaučuk získá naříznutím kůry a následuje samovolné vytékání do nádoby. Kaučuk se pak dále zpracovává s kyselinou mravenčí, která oddělí gumu od latexu. Kaučuk se poté suší, mele, zbavuje se nečistot a putuje do podniků na zpracování. (20)

Přírodní kaučuk společně s gutaperčou patří do skupiny polyprenů. Gutaperča se získává ze stromu *Palaquium gutta*, který roste v Jihovýchodní Indii, na Sumatře a v Asii. Gutaperča je guma, která se podobá kaučuku a používá se ve stomatologii jako výplň do kořenových kanálků zubů. (20)

Díky své vysoké molekulové hmotnosti (> 1 milion Da) má přírodní kaučuk těžko nahraditelné vlastnosti, které se napodobují uměle vyrobenými polymery. Tyto vlastnosti zahrnují odolnost, elasticitu, odolnost proti nárazu a dokáže efektivně rozptylovat teplo (minimalizace tepla při tření). Z přírodního kaučuku se vyrábějí lékařské rukavice, kondomy, zdravotnické pomůcky a pneumatiky. (20)

Syntetický kaučuk je druh pryže a nahrazuje přírodní kaučuk. Byl objeven v roce 1940 v USA. Syntetický kaučuk dokáže zcela nahradit kaučuk přírodní, a dokonce se u něj dosahuje lepších výsledků, používá se především na výrobu pneumatik. (20)

2.4.2 Celulóza

Celulóza je základní stavební látkou buněčných stěn rostlin a je nejrozšířenějším biopolymerem na světě. Z celulózy se vyrábí především papír a má využití v textilním průmyslu. (2,18,19)

2.4.3 Škrob

Škrob je zásobní látkou rostlin, patří mezi polysacharidy a vzniká jako konečný produkt fotosyntézy. Ukládá se ve formě škrobových zrn v zásobních orgánech rostlin. Ze škrobu se dále vyrábí termoplastifikovaný škrob (TPS), který se využívá především v zemědělství. Vyrábějí se z něho mulčovací biodegradovatelné fólie, dále se aplikuje v oblasti obalové techniky, v tomto odvětví se z termoplastifikovaného škrobu vyrábějí environmentálně přijatelné obaly. (21)

2.4.4 Lignin

Lignin je druhou nejčastější organickou sloučeninou na Zemi, je hlavní složkou dřeva, kde tvoří 25 % biomasy. Lignin je odpovědný za voděodolnost dřeva, zvyšuje jeho pevnost a zachycuje tlaková zatížení. Navzdory dostupnosti ligninu je jeho použití omezené z důvodu složité a proměnlivé struktury přírodního polymeru. Jeho nejčastější využití je v podobě plniva pro kompozitní materiály. (22)

2.4.5 Bílkoviny

Bílkoviny jsou vysokomolekulární látky složené z aminokyselin a jsou podstatou všech živých organismů. Rostliny jsou schopny vytvářet bílkoviny z dusičnanů, člověk společně s živočichy je přijímá s potravou. Bílkoviny jako biopolymery jsou využívány především v medicíně. Pomocí kolagenu se například opravují cévy a zhotovují se z něj cévní náhrady. (23)

2.4.6 Chitin a chitosan

Chitin je společně s celulózou nejrozšířenějším polysacharidem na Zemi. Chitin je součástí kutikul členovců a je přítomen v buněčných stěnách hub. Chitosan je nevstřebatelný polysacharid, který se získává z chitinu. Je zastoupen ve schránkách krevet, mušlí a krabů. Tyto látky se využívají v potravinářství, zemědělství a ve zdravotnictví. (17,18)

3 Plastový odpad

Z pohledu práva je odpad definován zákonem č.541/2020 Sb. jako každá movitá věc, které se člověk zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se ji zbavit. Odpady vznikají ve výrobní sféře (průmyslové, energetické, zemědělské) nebo ve sféře společenské, která patří ke komunálnímu odpadu. Komunální odpad je podle platné legislativy movitá věc, která je vyprodukována činností fyzických a právnických osob nebo obcí.

Dle zákona č. 541/2020 Sb. je každý povinen nakládat s odpadem pouze způsobem stanoveným tímto zákonem a jinými předpisy vydanými na ochranu životního prostředí a zdraví lidí pro daný druh kategorie odpadu. Účelem je zajistit vysokou ochranu životního prostředí a zdraví lidí a trvale udržitelné využívání přírodních zdrojů.

3.1 Produkce plastového odpadu

V současné době se ročně vyrobí téměř 400 miliónů tun plastu, který se z velké většiny postupem času stane odpadem. Z celkové roční produkce odpadů skončí odhadem 8 miliónů tun v oceánech. Skutečné množství vyprodukovaného plastového odpadu je velmi těžko odhadnutelné a jeho ekologický význam je stále nejasný. Je zřejmé, že kumulace plastového odpadu ve složkách životního prostředí (suchozemského, sladkovodního, mořského, atmosférického) musí být co nejdříve redukována. (24)

Během posledního desetiletí se stal plastový odpad jedním z největších problémů, se kterým se potýkáme v rámci životního prostředí. Vodní i suchozemští živočichové jsou ohroženi přítomností plastového odpadu ve svém životním prostředí, a to může vést k narušení fungování celých ekosystémů. (24)

Po vypuknutí pandemie Covidu-19 sehrály plasty důležitou roli, vzrostla výroba zdravotnických pomůcek (roušky, respirátory, testy). Množství vyprodukovaného odpadu v době pandemie se odhaduje na 1,6 milionu tun na den, což masivně narušilo systémy likvidace odpadu před pandemií. (25)



Obr. č. 7: Vyhozený plastový respirátor v životním prostředí, využívaný při pandemii Covidu-19. (foto: P. Heřmanová)

3.2 Plastový odpad v oceánech

Nejviditelnějším problémem je zamoření oceánů plastovým odpadem, který je hrozbou pro organismy žijící v oceánu. Plastový odpad živočichům může způsobit omezení jejich pohybu zaplétáním, které může vést až k úhynu, dále dochází k požití plastového odpadu živočichy (viz Obr. č. 8). Existuje několik zpráv o nálezu plastových sáčků v žaludcích mořských želv. Želva zamění plastový sáček za medúzu, která je její přirozenou potravou. V konečném důsledku želva umírá na vyhladovění. (26,27)



Obr. č. 8: Mořská želva konzumující plastový sáček.

Výsledky studií mořských ekosystémů dokládají, že každý třetí druh mořského živočicha byl nalezen zapletený do mořského odpadu a 90 % všech mořských ptáků má v žaludku plast. (26,27,28)

V roce 2019 provedl průzkumník Victor Vescovo nejhlubší mořský ponor s lidskou posádkou do prohlubně Challenger Deep, který se nachází v Mariánském příkopu v Tichém oceánu, a při ponoru ve větší hloubce narazil na plastový sáček. (29)

V posledním desetiletí se zkoumaly škodlivé účinky menších částic plastů na různé organismy. Četné studie dokumentovaly požívání úlomků plastů mořskými druhy, přičemž novější výzkumy se zaměřovaly na sekundární dopady požívání plastických částic na procesy v ekosystému. Např. ve studii Wieczorek et.al. (2015; 30) bylo odebráno 233 rybích střev od sedmi různých druhů mezopelagických ryb (hlubokomořských ryb). Vzorky byly odebrány z této skupiny z důvodu nejhojnějšího počtu v rámci pelagických skupin v našich oceánech a díky jejich vertikální migraci, kterou přispívají k transportu uhlíku a živin do hlubin moře. Požití úlomků plastů mezopelagickými rybami usnadňuje transport těchto částic z povrchových vod do hlubokomořského bentosu. Výsledky studie ukázaly, že 73 % všech ryb mělo plasty obsažené ve svém střevním obalu (viz Obr. č. 9). Dále bylo zjištěno, že hloubka, ve které byly ryby uloveny, nemá žádný vliv na množství drobných částic plastů v organismu.

Další hrozbou jsou plastové částice tzv. mikroplasty a nanoplasty. Tyto úlomky plastů nejsou většinou okem viditelné, jejich vznik a transport do životního prostředí popisují v dalších kapitolách.

3.3 Mikroplasty

Mikroplasty jsou částice o velikosti menší než 5 mm, spodní hranice je uváděna v rozmezí 20 až 0,1 μm . Mikroplasty (MP) jsou tvořeny drobnými úlomky plastů a mohou mít různé formy, mohou se vyskytovat ve tvaru kuliček nebo vláken. (31,32)

Dle původu se mikroplasty se člení do dvou skupin, a to na mikroplasty primární a mikroplasty sekundární. Primární MP jsou vyráběné záměrně (kosmetika, medicína), zatímco sekundární MP vznikají postupnou fragmentací a zvětráváním větších částí plastů (makroplastů), které byly degradovány, a narušila se jejich struktura. Zdrojem primárních MP jsou produkty osobní péče (řasenky, čisticí prostředky na obličej, zubní pasty). Jejich dalším zdrojem jsou léčiva, která slouží v medicíně jako vektory pro transport léků. Zdrojem sekundárních MP je plastový odpad. (32,33)

3.4 Vnik mikroplastů do potravních řetězců

V posledních letech se velmi často diskutuje o MP v životním prostředí. MP byly nalezeny v téměř každém ekosystému na Zemi, pro snížení jejich úniku do těchto sfér je důležité znát jejich původ. Jakmile se MP uvolní do životního prostředí, jsou transportovány různými cestami, včetně vzduchu, vody a půdy a následně mohou vniknout do potravních řetězců. V následujícím textu charakterizují blíže transport MP do životního prostředí. (32,34)

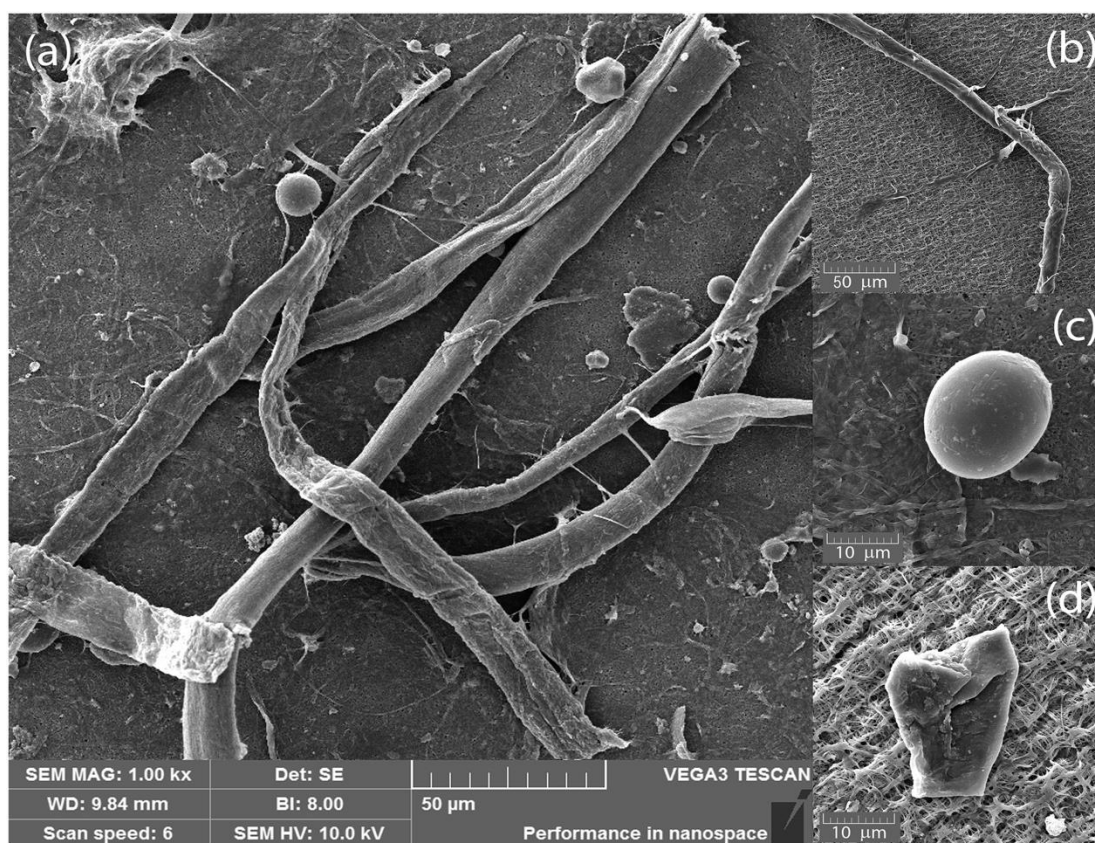
Transport MP do zemědělské půdy a následný potenciální transport do potravního řetězce vzniká mechanickým narušením plastového odpadu na zemědělské půdě prostřednictvím pojezdu zemědělské techniky (viz. Obr. č. 10). Při oděru se plast naruší a fragmentuje na menší částice.



Obr. č. 9: Plastový odpad na poli. (foto: K. Perná)

Problematické jsou MP ve vodních zdrojích. MP se do povrchových vod (jezera, nádrže, řeky) dostávají především z průmyslové výroby a z odpadních komunálních vod. MP uvolňované při praní oblečení vyrobeného ze syntetických materiálů a dále čističí prostředky spolu s kosmetikou představují nejvýznamnější zdroj MP v odpadních vodách z domácností. (35,36)

Čističky odpadních vod jsou schopné pojmout pouze část obsažených MP, zbývající MP setrvávají ve vodním prostředí. Řada studií z posledních let dokládá přítomnost MP i v pitné vodě, čímž se MP mohou přímo dostávat do lidského těla. (Dalmau-Soler et al., 2021; 37, Schymanski et al., 2021; 38)



Obr. č. 10: Nález mikroplastů v pitné vodě.

3.5 Nanoplasty

Nanoplasty (NP) jsou plastové částice o velikosti menší než 0,1 μm . NP se uvolňují z částic MP a je pravděpodobné, že jsou škodlivější než MP, jsou totiž dostatečně malé na to, aby pronikaly přes biologické membrány. (39,40,41)

NP vznikají rozpadem MP vlivem povětrnostních vlivů a fotodegradace. Do životního prostředí jsou transportovány obdobně jako MP a hromadí se v ekosystémech. (39,40,41)

3.6 Vliv mikroplastů a nanoplastů na lidské zdraví

MP či NP mohou vniknout do lidského organismu vdechnutím a při následném vydechnutí se mohou tyto částice zachytit v plicích nebo se s výdechem dostanou pryč z organismu. Dále se mohou MP a NP dostat do organismu konzumací kontaminované potravy. (42,43,44)

Toxicita MP a NP pro lidský organismus není dosud dostatečně prostudována. Dosud se touto problematikou zabývalo pouze několik studií. Studie zdokumentovaly určitý stupeň buněčné toxicity nebo patologického účinku na lidské buňky. Toxicita MP závisí na jejich tvaru, velikosti a chemickém složení. Obecně jsou menší částice toxičtější, protože mohou snáze procházet buněčnými membránami. MP navíc do sebe kumulují toxické chemikálie z prostředí, např. polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), perzistentní organické polutanty (POP) a těžké kovy. (42,43,44)

Plastové mikročástice o průměru menším než 130 μm mohou být translokovány do lidských tkání, kde mohou vyvolávat lokalizovanou imunitní odpověď a zároveň uvolňovat monomery a další toxické látky přidávané při výrobě plastů pro vylepšení jejich vlastností (aditiva). NP jsou schopny proniknout i do buněčných membrán. Toxicita a dopad NP na lidské zdraví je velmi diskutovaným tématem, ale zatím není prokázán žádný prokazatelně škodlivý vliv na lidský organismus. (42,43,44)

MP a NP mohou lidské zdraví ovlivnit jak po fyzikální, tak po chemické stránce. Vylučovací systém zbavuje lidské tělo více než 90 % požitých MP a NP. Rychlost a množství vyloučených MP a NP z těla ovlivňují faktory jako je jejich tvar, velikost, typ polymeru a aditivní chemikálie. Uvádí se, že přítomnost MP v těle může poškodit střevní mikrobiom, může vést k zánětům, oxidačnímu stresu, porušení funkcí lymfatických uzlin a může docházet až ke karcinogenezi. (42,43,44)

Jedna ze studií (Chan et al. 2019; 45) se zabývala inhalací MP a NP lidmi ze vzduchu. Autoři studie zjistili, že MP a NP mohou mít cytotoxické účinky, oxidační stres a zánětlivé reakce v lidských plicních epitelálních buňkách. Na základě další studie vyplynulo, že MP mohou přenášet bakterie a viry, což naznačuje jejich potenciální roli při přenosu nemocí.

Závěrem lze říci, že MP i NP jsou rizikem pro životní prostředí i pro lidské zdraví. Existují obavy z potenciálních rizik pro lidský organismus, jako je poškození gastrointestinálního systému a obavy z přenášení patogenů, virů a škodlivých chemikálií. Je zapotřebí více výzkumů, abychom plně porozuměli rozsahu rizik, která MP a NP představují, a vyvinuli účinné strategie ke zmírnění jejich dopadu na životní prostředí a lidské zdraví.

4 Biodegradace

Degradace je jakákoli fyzikální nebo chemická změna v polymeru způsobena faktory prostředí, jako je světlo, teplo, vlhkost, chemické podmínky a biologická aktivita. Biodegradace je dále chápána jako rozklad molekul působením enzymů produkovaných mikroorganismy. Biodegradabilní procesy jsou zásadní pro udržení ekologické rovnováhy a čistoty prostředí. (46,47)

Dle Danso et al. (2019; 48) neměly organismy dosud dostatek času na to, aby vyvinuly vysoce aktivní enzymy rozkládající plastové polymery. Mimo to jsou v životním prostředí akumulovány různé druhy plastů, které obsahují aditiva, což dále zpomaluje biodegradaci.

4.1 Degradace polymerů

Mezi faktory působící na degradaci polymerů patří teplo, sluneční záření a ozon. Tyto faktory vedou k různým typům degradace, jako je tepelná degradace (termodegradace), fotodegradace a chemická degradace (chemodegradace). V následujících kapitolách popsuji jednotlivé degradační procesy, které předcházejí vlastní biodegradaci. (49)

4.1.1 Fotodegradace

Fotodegradace je nevratný proces, při kterém se vlastnosti polymeru mění v důsledku absorpce fotonů ze slunečního záření. Záření dopadající na zemský povrch je složeno ze tří složek (viditelné, ultrafialové a infračervené). Každé záření má jinou energetickou úroveň. Ultrafialové záření (UV) představuje pouze 8 % celkového slunečního záření, má však nejvíce energie a jeho působením probíhá degradace polymerů. (50)

4.1.2 Chemodegradace

Jedná se o proces, při kterém je materiál degradován prostřednictvím chemických látek působících v daném prostředí. Typický příklad chemodegradace je oxodegradace, při které se sloučí daný polymer s kyslíkem z prostředí a následně je prostřednictvím mikroorganismů biodegradován. Plastické hmoty jako jsou PET, PVC, PS, PE jsou oxodegradací obtížně rozložitelné, pro urychlení procesu jsou do plastových hmot přidávána různá aditiva, jako jsou hořčík a kobalt. (51)

4.1.3 Termodegradace

Termodegradace je proces, při kterém se polymery rozpadají za působení tepla. Hlavním činitelem při termodegradacním procesu je teplota, která má na polymery fyzikální a chemický vliv, dochází ke štěpení chemických vazeb. (52)

4.2 Biologicky odbouratelné polymery

Biologicky odbouratelné polymery lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou polymery, které jsou skutečně biologicky odbouratelné, patří mezi ně veškeré přírodní polymery, které jsou zmíněny v kapitole 2.4, chemická struktura těchto polymerů umožňuje jejich přímou enzymatickou degradaci. Do druhé skupiny biodegradabilních polymerů řadíme syntetické polymery podléhající nejprve fotodegradaci a termodegradaci a jsou věnovány následující kapitoly 4.2.1 až 4.2.5. (20)

4.2.1 Polyethylen

Polyethylen je stabilní polymer, skládající se z dlouhých řetězců ethylenových monomerů. Vědci zjistili, že ho nelze snadno degradovat pomocí mikroorganismů, ale oligomery PE s nižší molekulovou hmotností jimi mohou být částečně degradovány. Proces biodegradace PE je velmi pomalý, ve výzkumu byla použita široká škála aktinomycet, jako je rod *Streptomyces*, a dále houby *Aspergillus flavus* a *Penicillium simplicissimum*. Je známo, že k degradaci polyethylenu dochází součinností hydrodegradace (rozklad působením vody) a mikroorganismů nebo tzv. oxobiodegradací (kombinací oxodegradace a biodegradace). Tyto mechanismy lze podpořit přidavkem škrobu a prooxidantu, které se využívají při syntéze biodegradabilního polymeru. (53)

4.2.2 Polypropylen

Polypropylen může být degradován při jeho vystavení UV záření a může být také oxidován při vysokých teplotách. Možnosti degradace PP mikroorganismy byly zkoumány a bylo zjištěno, že druh houby *Aspergillus niger* a některé bakterie rodu *Pseudomonas* a *Vibrio* rozkládají PP. V průběhu biodegradace byl pozorován pokles viskozity a vznik karbonylu a karboxylu. (54)

4.2.3 Polystyren

Tento polymer s vysokou molekulární hmotností je velmi obtížně biologicky odbouratelný. Stupeň biodegradace PS prostřednictvím aktinomycet je velmi nízký.

Kaplan et al. (1979; 55) zkoumali biodegradaci PS sedmnácti druhy hub schopných degradovat plasty. Zjistili celkově nízkou rychlost rozkladu, která však byla významně zvýšena přidávkou celulózy a minerálů. (56)

4.2.4 Polyvinylchlorid

Existuje mnoho studií o tepelné fotodegradaci PVC, ale pouze několik výzkumů o jeho biologickém rozkladu. Podle Kirbase et al. (1999; 57) může být PVC s nízkou molekulovou hmotností biologicky degradován houbami bílé hniloby.

4.2.5 Polyethylentereftalát

Polyethylentereftalát byl dříve považován za materiál, který nepodléhal biodegradaci. Postupem let byly popsány enzymy hydrolyzující PET. V současné době známe několik PET hydroláz. Dle Yoshida et. al (2016; 59) dokáže bakterie *Ideonella sakaiensis* degradovat PET. *I. sakaiensis* dokáže přilnout k povrchu PET a následně vylučovat enzymy, které PET degradují. Jedná se o enzymy PETáza (hydroláza) a MHETáza. (58)

4.3 Průběh biodegradace

Průběh biodegradace je tedy závislý na abiotických (podnebí, ovzduší, vlhkost, voda, teplota, světlo) a biotických faktorech (přímé nebo nepřímé působení ostatních organismů). Biodegradace probíhá buď v aerobních, nebo v anaerobních podmínkách. Na biodegradaci přírodních i syntetických polymerů se podílejí mikroorganismy, jako jsou houby, bakterie a aktinomycety. (59,60)

Obecný mechanismus biodegradace polymerů probíhá následujícím způsobem. Mikroorganismus přilne k povrchu polymeru. Jelikož mikroorganismy nejsou schopny transportovat polymery přímo přes své buněčné membrány dovnitř buňky, kde probíhá většina biochemických procesů, neboť molekuly polymeru jsou dlouhé a nejsou rozpustné ve vodě, vyvinuly mikroorganismy strategii, při které vylučují extracelulární enzymy. Tyto enzymy štěpí řetězce na menší fragmenty s nižší molekulovou hmotností, jako jsou monomery, dimery a oligomery. Produkty této depolymerace (oligomery, dimery a monomery) jsou následně transportovány přes cytoplazmatickou membránu a jsou využívány jako zdroj energie prostřednictvím beta oxidace a trikarboxylových kyselin (TCA), čímž se uvolňuje voda a CO_2 (viz Obr. č. 12). (59,60,61)

4.3.1 Aerobní biodegradace

Proces aerobní biodegradace probíhá za přítomnosti kyslíku a její průběh je pomalejší než u anaerobní biodegradace. Při procesu využívají aerobní mikroorganismy kyslík jako akceptor elektronů. (59,62)

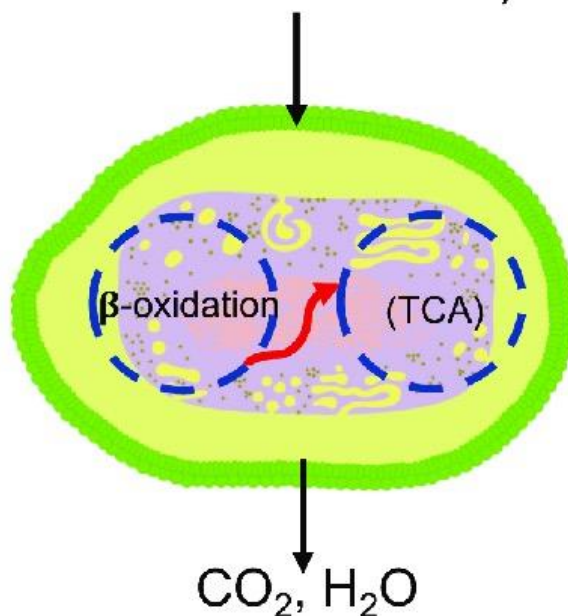
4.3.2 Anaerobní biodegradace

Anaerobní biodegradace je rozklad polymerů organismy za nepřítomnosti kyslíku. Některé anaerobní bakterie používají jako akceptory elektronů dusičnany, sírany, železo a oxid uhličitý, aby polymery postupně rozložily. (59,62)

4.3.3 Mineralizace

Mineralizace je konečnou fází biodegradace, při které vznikají anorganické látky, CO_2 , H_2O nebo CH_4 . (59,62)

Bioassimilation
(transport through
the cell membrane)



Obr. č. 11: Bioasimilace – transport přes buněčnou membránu.

Dle Sánchez (2020; 63) mají houby přirozenou a jedinečnou schopnost působit pomocí enzymů na nespecifické substráty a detoxikovat tak znečišťující látky. Houby mohou produkovat hydrofobiny (skupina aminokyselin), které mají schopnost připojit hyfy (vlákna hub) k hydrofobním substrátům. Hyfy dále pronikají do trojrozměrných substrátů. Studie biologického rozkladu plastů ukázaly, že houby jsou schopny využívat tyto materiály jako jediný zdroj uhlíku a energie. Je zapotřebí dalších výzkumů zabývajících se urychlení biodegradačních procesů.

4.4 Faktory ovlivňující biodegradaci

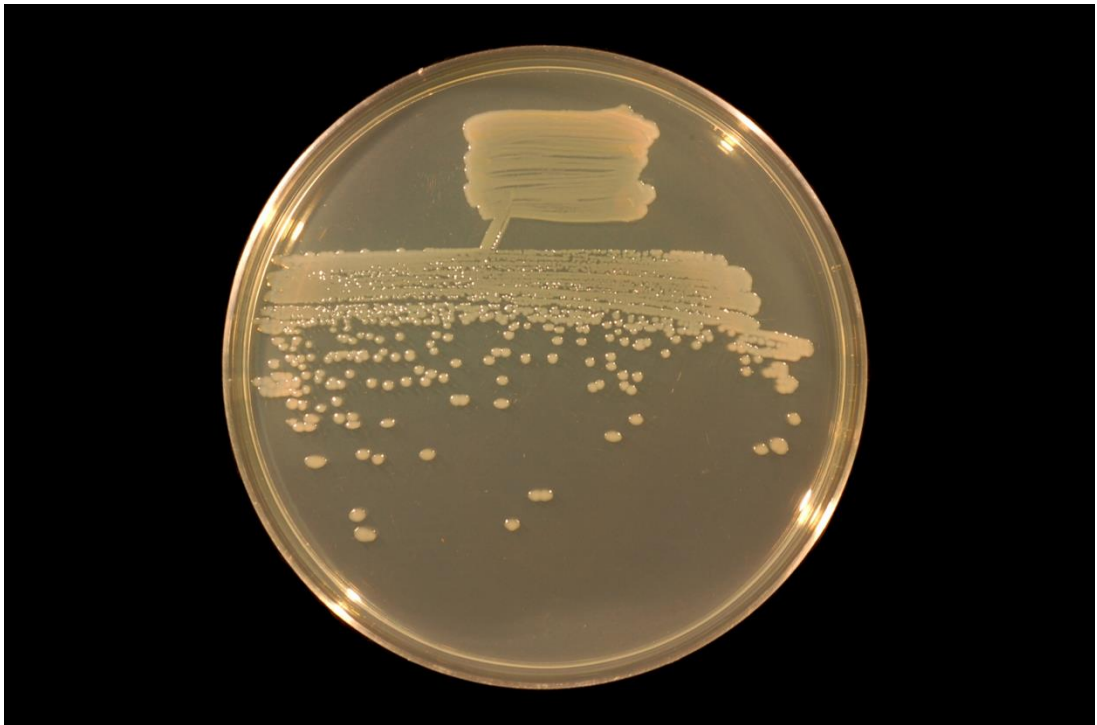
Biologická odbouratelnost polymeru je určena jeho následujícími fyzikálními a chemickými vlastnostmi (47,62):

- Molekulová hmotnost a hustota polymeru (nižší degraduje rychleji než vyšší)
- Molekulární složení (směs)
- Povaha a fyzikální forma polymeru (vlákna, filmy, pelety)
- Tvrdost (měkké polymery degradují rychleji než tvrdé)
- Dostupnost funkčních skupin, které zvyšují hydrofobnost (hydrofilní degradace je rychlejší než hydrofobní)
- Strukturální složení polymeru, jako je linearita nebo rozvětvení v polymeru
- Přítomnost snadno štěpitelných vazeb, jako jsou esterové nebo amidové vazby
- Vlhkost, teplota, pH, salinita, přítomnost nebo nepřítomnost kyslíku, sluneční záření

4.5 Organismy degradující syntetické polymery

Odolná povaha plastů je způsobena jejich vysokou molekulovou hmotností, složitou trojrozměrnou strukturou a hydrofobní povahou, které všechny brání jeho dostupnosti pro mikroorganismy. Aditiva, antioxidanty a stabilizátory používané při výrobě polymeru mohou zpomalit rychlost degradace a mohou být toxické pro mikroorganismy. (64,65,66)

Nejvyužívanějšími mikroorganismy pro biodegradaci polymerů jsou bakterie *Pseudomonas fluorescens*, *P. aeruginosa* a houba *Penicillium simplicissimum*. (64,65,66)



Obr.č.12: *Pseudomonas fluorescens*.



Obr.č.13 *Pseudomonas aeruginosa*.

4.5.1 Houby

V následující Tabulce č. 2 je zobrazen přehled nejčastěji využívaných hub v rámci výzkumu mikrobiálního rozkladu plastů. V přehledu je zahrnut testovaný substrát, výsledky výzkumu a zdrojová studie. Problémem mnohých studií je absence dat o způsobu vyhodnocení rozkladu a zároveň často chybí údaje o tom, do jaké míry byl plast rozložen. Houby patří mezi nejvýznamnější rozkladače syntetických polymerů, mají nejsilnější enzymatický aparát. (63)

Tab. č. 2: Rozklad plastů houbami

Testovaný organismus	Plast jako substrát	Zjištění	Reference
<i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus sydowii</i>	PE	Kmeny hub byly účinné na základě úbytku hmotnosti a snížení pevnosti v tahu po 60 dnech. (FTIR a SEM)	Sangale et al. 2019
<i>Chaetomium globosum</i>	PVC	PVC vykazovalo růst a adhezi fertilních struktur po 28 dnech.	Vivi et al. 2019
<i>Zalerion maritimum</i>	PE mikropasty	Tato mořská houba byla schopna využívat mikropasty PE, snížila se velikost i hmotnost po 28 dnech.	Paço et al. 2017
<i>Thermomyces</i>	Nízkokrystalické PET folie	Ztráta hmotnosti během 96 hodin, plísňová kutináza degradovala PET na TPA.	Ronkvist et al. 2009
<i>Fusarium sp.</i>	PA 4 (nylon 4) folie	Morfologická poškození byla pozorována na povrchu filmu nylonu 4 po 2 měsících. (SEM)	Tachibana et al. 2010

4.5.2 Bakterie

Dle Krueger et al. (2015; 67) a Jones et al. (1974; 68) jsou některé specifické kmeny používané při degradaci plastových odpadů známé již od 70. let 20. století. Jedná se především o zástupce rodu *Moraxella*, *Nocardia*, *Streptomyces*, *Streptococcus* a *Staphylococcus*. (69)

Delacuvellerie et al. (2019; 70) zkoumali potenciální dopady *Alcanivorax borkumensis* na degradaci plastů v mořské plastisféře (plastické prostředí). Autoři uvedli, že většina plastového odpadu zůstává na pevnině, a asi 32 % plastů končí v oceánu. Bylo zjištěno, že mikroby rodu *Arenibacter* a *Marinobacter* jsou schopny rozkládat PET. Na závěr autoři navrhuji využití *Alcanivorax borkumensis* jako nejlepšího kandidáta při odbourávání plastových odpadů. (70)

Kumar et. al. (2016; 71) zkoumali ve své studii půdní bakterie. Ve své studii zkoumali šest různých druhů obalových plastů (nízkohustotní polyethylen LDPE) lišících se obsahem škrobu. Z výsledků studie vyplynulo, že bakteriální konsorcium v půdě dokáže degradovat LDPE s přimíchaným škrobem. Škrobové polymery tedy mohou být degradovány půdními mikroorganismy.

4.6 Metody hodnocení biodegradace

V této kapitole popisují nejvyžívanější metody pro hodnocení biodegradaci plastů a následně popisují jejich výhody a nevýhody při praktickém využití.

4.6.1 FTIR metoda

Dle Bian et. al. (2022; 72) je FTIR (Fourier Transform Infra Red spectroscopy = infračervená spektroskopie) jednou z nejvhodnějších metod, jak analyzovat průběh biodegradace. FTIR spektroskopie umožňuje indikovat zkrácení řetězce daného polymeru, což dokazuje probíhající biodegradaci. Analýza vzorků je poměrně jednoduchá, nevyžaduje pracné kroky pro přípravu vzorků a interpretaci analýzy. Jedná se o rychlou a přesnou analýzu. V publikovaných vědeckých článcích je FTIR analýza často využívanou metodou. (Sangale et al. 2019; 73)

4.6.2 Metoda úbytku

Tato metoda je založena na úbytku hmotnosti daného polymeru. V průběhu analýzy se daný vzorek váží a následně se vyhodnocuje, do jaké míry proběhla biodegradace. Analýza je velmi jednoduchá. Její nevýhodou je získání jediného údaje o biodegradaci, a to je úbytek váhy. Dle publikovaných vědeckých článků je metoda úbytku často využívanou analýzou pro hodnocení biodegradace. (74)

4.6.3 SEM analýza

Skenovací elektronová mikroskopie je metoda, která umožňuje vysoké zvětšení obrazu a při hodnocení biodegradace umožňuje zobrazení detailů rozrušených částic plastů, což vědcům umožňuje podrobné hodnocení biodegradace. (75)

Závěr

Současné poznatky o biodegradaci plastů ukazují, že existuje mnoho mikroorganismů, které se podílejí na biodegradaci plastů. Radíme mezi ně houby, bakterie, které produkují účinné enzymy. Tyto mikroorganismy naruší strukturu polymeru nebo dojde jejich působením k úbytku hmoty nebo nastane změna vlastností. V dnešní době není známý žádný organismus, který by byl schopen zcela degradovat syntetické plasty.

Tématem biodegradace se zabývalo mnoho studií a bylo zkoumáno mnoho mikroorganismů. V těchto studiích jsou ještě velké mezery. Autoři provádějí testy v laboratořích za specifických podmínek a neuvádějí, do jaké míry degradace proběhla. Do této práce je zahrnuto několik nejvýznamnějších mikroorganismů, které dokážou degradovat nejpoužívanější druhy plastů.

Dle mého názoru je biodegradace pomocí mikroorganismů dobrou možností na cestě při boji s plastovým odpadem, stále je však zapotřebí více studií, aby byly nalezeny mikroorganismy, které dokážou efektivně degradovat syntetické polymery. Vývoj nových biologicky rozložitelných plastů a jejich aplikace by mohl přispět k úbytku plastového odpadu v životním prostředí.

Seznam použité literatury

- 1) MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
 - 2) REICHERDT, W. *Ako vznikajú plastické hmoty*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1964. Polytechnická knižnica (Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry).
 - 3) HAHLADAKIS, John N., Costas A. VELIS, Roland WEBER, Eleni IACOVIDOU a Phil PURNELL. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2018, 344, 179-199 [cit. 2023-04-28]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.014
 - 4) WATERS, Colin N., Jan ZALASIEWICZ, Colin SUMMERHAYES, et al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* [online]. 2016, 351(6269) [cit. 2023-04-28]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science. aad2622
 - 5) ZALASIEWICZ, Jan, Colin N. WATERS, Juliana A. IVAR DO SUL, et al. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene* [online]. 2016, 13, 4-17 [cit. 2023-04-28]. ISSN 22133054. Dostupné z: doi: 10.1016/j.an-cene.2016.01.002
 - 6) CHAMAS, Ali, Hyunjin MOON, Jiajia ZHENG, et al. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* [online]. 2020, 8(9), 3494-3511 [cit. 2023-04-28]. ISSN 2168-0485. Dostupné z: doi:10.1021/acssuschemeng.9b06635
-

-
- 7) REINKEL, S. (2011). A brief history of plastic's conquest of the world. *Scientific American*; May 29, 2011. Dostupné z: A Brief History of Plastic's Conquest of the World – Scientific American
 - 8) <https://publi.cz/books/180/18.html>
 - 9) BUSICO, Vincenzo; CIPULLO, Roberta. Microstructure of polypropylene. *Progress in Polymer Science*, 2001, 26.3: 443-533.
 - 10) MADDAH, Hisham A. Polypropylene as a promising plastic: A review. *Am. J. Polym. Sci*, 2016, 6.1: 1-11.
 - 11) MACKENZIE, PCI Wood. Global Fibres supply demand report 2017. *PCI Wood Mackenzie, Oberursel, Germany*, 2017.
 - 12) MACARTHUR, Dame Ellen; WAUGHURAY, Dominic; STUCHTEY, Martin R. The new plastics economy, rethinking the future of plastics. In: *World Economic Forum*. London, UK: Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, 2016.
 - 13) <https://news.nationalgeographic.com/2018/05/plastics-facts-infographics-ocean-pollution/>.
 - 14) <https://plasticoceans.org/the-facts/>
 - 15) GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 2017, 3.7: e1700782.
-

-
- 16) BORIS, Eileen. Jeffrey L. Meikle. *American Plastic: A Cultural History*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press. 1995. Pp. xiv, 403. \$49.95. 1997.
- 17) KROISOVÁ, Dora. *Biodegradovatelné polymery – úvod do problematiky*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-468-9.
- 18) KUPEC, Jan; CHARVÁTOVÁ, Kateřina; KŘESÁLKOVÁ, Martina. Biopolymery jako plniva v plastech. *Chemické listy*, 2003, 97.3: 155-159.
- 19) PAN, Yude, et al. The structure, distribution, and biomass of the world's forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 593-622.
- 20) JEŘÁBKOVÁ, Kristýna. *Přírodní kaučuk, vlastnosti a současné využití*. 2016.
- 21) SLAVÍKOVÁ, Halka. Biodegradabilní plasty a jejich využití. Odpadové fórum 2008: sborník přednášek: Milovy hotel Devět skal, 16.-18. duben 2008. 1. díl Biodegradabilní, nebezpečné, minerální odpady, materiálové a energetické využití, diskusní fórum, 2008, 3150-3157.
- 22) KABASCI, Stephan. Biobased plastics. In: *Plastic waste and recycling*. Academic Press, 2020. p. 67-96.
- 23) SVAČINA, Štěpán. *Klinická dietologie*. Praha: Grada, 2008. ISBN isbn978-80-247-2256-6.
-

-
- 24) LETCHER, Trevor M. (ed.). *Plastic waste and recycling: Environmental impact, societal issues, prevention, and solutions*. Academic Press, 2020.
- 25) BENSON, Nsikak U.; BASSEY, David E.; PALANISAMI, Thavamani. COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, 2021, 7.2: e06343.
- 26) SANTILLO, David; MILLER, Kathryn; JOHNSTON, Paul. Microplastics as contaminants in commercially important seafood species. *Integrated environmental assessment and management*, 2017, 13.3: 516-521.
- 27) MTN029.PDF (seaturtle.org)
- 28) GALL, Sarah C.; THOMPSON, Richard C. The impact of debris on marine life. *Marine pollution bulletin*, 2015, 92.1-2: 170-179.
- 29) <https://time.com/5588691/victor-vescovo-plastic-oceans/>
- 30) WIECZOREK, Alina M., et al. Corrigendum: Frequency of microplastics in mesopelagic fishes from the Northwest Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 1-1.
- 31) LUSHER, Amy. Microplastics in the marine environment: distribution, interactions and effects. *Marine anthropogenic litter*, 2015, 245-307.
- 32) GREŇČÍKOVÁ, A. N. N. A., et al. Mikroplasty ako environmentálne riziko. *Chemické listy*, 2019, 113.1: 16-22.
-

-
- 33) AUTA, Helen Shnada; EMENIKE, C. U.; FAUZIAH, Shahul Hamid. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment international*, 2017, 102: 165-176.
- 34) RYAN, Peter G. A brief history of marine litter research. *Marine anthropogenic litter*, 2015, 1-25.
- 35) <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b03045>
- 36) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X15301478>
- 37) DALMAU-SOLER, Joan, et al. Microplastics from headwaters to tap water: occurrence and removal in a drinking water treatment plant in Barcelona Metropolitan area (Catalonia, NE Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 1-11.
- 38) SCHYMANSKI, Darena, et al. Analysis of microplastics in drinking water and other clean water samples with micro-Raman and micro-infrared spectroscopy: minimum requirements and best practice guidelines. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2021, 413.24: 5969-5994.
- 39) LAMBERT, Scott; WAGNER, Martin. Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene. *Chemosphere*, 2016, 145: 265-268.
-

-
- 40) Nel, A.; Xia, T.; Madler, L.; Li, N. Toxic Potential of Materials at the Nanolevel. *Science* 2006, 311 (5761), 622–627
- 41) BARNES, David KA, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 2009, 364.1526: 1985-1998.
- 42) WRIGHT, Stephanie L.; KELLY, Frank J. Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*, 2017, 51.12: 6634-6647.
- 43) EFSA PANEL ON CONTAMINANTS IN THE FOOD CHAIN (CONTAM). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *Efsa Journal*, 2016, 14.6: e04501.
- 44) LEUGERING, H. J.; PÜSCHNER, H. Identification of wear particles in tissue after implantation of different plastic materials. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1978, 12.4: 571-578.
- 45) LI, Yanting, et al. Inhaled tire-wear microplastic particles induced pulmonary fibrotic injury via epithelial cytoskeleton rearrangement. *Environment International*, 2022, 164: 107257.
- 46) KALE, Swapnil Kisanrao, et al. Microbial degradation of plastic: a review. *Journal of Biochemical Technology*, 2015, 6.2: 952-961.
- 47) HIROTO, M., et al. Breakdown of plastics and polymers by microorganisms. *Microbial and enzymatic bioproducts*, 1995, 151-194.
-

-
- 48) DANSO, Dominik; CHOW, Jennifer; STREIT, Wolfgang R. Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and environmental microbiology*, 2019, 85.19: e01095-19.
- 49) BANO, K., Kuddus, M., Zaheer, M. R., Zia, Q., Khan, M. F., Ashraf, G. M., Gupta, A., Aliev, G. (2017) Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics. *Current Pharmaceutical Biotechnology* 18 (5): 429-440.
- 50) SHAWAPHUN, Sarinya; MANANGAN, Thara; WACHARAWICHANANT, Sirirat. Thermo-and photo-degradation of LDPE and PP films using metal oxides as catalysts. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2010. p. 505-508.
- 51) KARIMI, Samira, et al. A review on graphene's light stabilizing effects for reduced photodegradation of polymers. *Crystals*, 2020, 11.1: 3.
- 52) DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vysoká škola chemicko-technologická, 1995.
- 53) BONHOMME, S., et al. Environmental biodegradation of polyethylene. *PolymDegrad Stab* 81: 441–452. 2003.
- 54) Arutchelvi J, Sudhakar M, Arkatkar A, Doble M, Bhandari S, Uppara PV. 2008. Biodegradation of Polyethylene and Polypropylene. *Indian J Biotechnol* 7: 9-22.
- 55) TSUCHII A, Suzuki T, Takahara Y. 1977. Microbial Degradation of Styrene Oligomer. *Agric Biol Chem* 41:2417-2421.
-

-
- 56) KAPLAN, David L.; HARTENSTEIN, Roy; SUTTER, Jim. Biodegradation of polystyrene, poly (metnyl methacrylate), and phenol formaldehyde. *Applied and environmental microbiology*, 1979, 38.3: 551-553.
- 57) KIRBAŞ, Z.; KESKIN, NEVIN; GÜNER, A. Biodegradation of polyvinylchloride (PVC) by white rot fungi. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 1999, 63: 335-342.
- 58) ANANI, Osikemekha Anthony; ADETUNJI, Charles Oluwaseun. Bioremediation of polythene and plastics using beneficial microorganisms. *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment: Volume 3*, 2021, 281-302.
- 59) YOSHIDA, S. et all., A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*, 2016, 351.
- 60) ISHIGAKI, Tomonori, et al. The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. *Chemosphere*, 2004, 54.3: 225-233.
- 61) GU, Ji-Dong. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances. *International biodeterioration & biodegradation*, 2003, 52.2: 69-91.
- 62) KUMARI, Alka; CHAUDHARY, Doongar R.; JHA, Bhavanath. Microbial degradation of plastics and its biotechnological advancement. *Environmental Biotechnology Vol. 3*, 2021, 1-30.
-

-
- 63) SÁNCHEZ, Carmen. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro-and microplastics biodegradation. *Biotechnology advances*, 2020, 40: 107501.
- 64) SEYMOUR, Raymond B. Polymer science before and after 1899: notable developments during the lifetime of Maurits Dekker. *Journal of Macromolecular Science—Chemistry*, 1989, 26.8: 1023-1032.
- 65) KALE, Swapnil Kisanrao, et al. Microbial degradation of plastic: a review. *Journal of Biochemical Technology*, 2015, 6.2: 952-961.
- 66) PRIYANKA, Nayak; ARCHANA, Tiwari. Biodegradability of polythene and plastic by the help of microorganism: a way for brighter future. *J Environ Anal Toxicol*, 2011, 1.4: 1000111.
- 67) KRUEGER, Martin C.; HARMS, Hauke; SCHLOSSER, Dietmar. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Applied microbiology and biotechnology*, 2015, 99: 8857-8874.
- 68) JONES, D. M., et al. The recognition of biodegraded petroleum-derived aromatic hydrocarbons in recent marine sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 1983, 14.3: 103-108.
- 69) JACQUIN, Justine, et al. Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "Plas-tisphere". *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 865.
-

-
- 70) DELACUVELLERIE, Alice, et al. The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation. *Journal of hazardous materials*, 2019, 380: 120899.
- 71) KUMAR, B. Manoj; NOOBIA, Sabike; MYTHRI, S. Studies on biodegradation of plastic packaging materials in soil bioreactor. *Indian Journal of Advances in Chemical Science S1*, 2016, 297: 299.
- 72) BIAN, Wenxin, et al. The long-term effects of microplastics on soil organomineral complexes and bacterial communities from controlled-release fertilizer residual coating. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114193.
- 73) SANGALE, Manisha K.; SHAHNAWAZ, Mohd; ADE, Avinash B. Potential of fungi isolated from the dumping sites mangrove rhizosphere soil to degrade polythene. *Scientific Reports*, 2019, 9.1: 1-11.
- 74) PAÇO, Ana, et al. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 10-15.
- 75) SEM skenovací elektronová mikroskopie (laboratuar.com)
-

Seznam obrázků

Obrázek 1. Chemický vzorec PP: <https://publi.cz/books/180/18.html>

Obrázek 2. Chemický vzorec PE: <https://publi.cz/books/180/18.html>

Obrázek 3. Chemický vzorec PVC: <https://publi.cz/books/180/18.html>

Obrázek 4. Chemický vzorec PS: <https://publi.cz/books/180/18.html>

Obrázek 5. Chemický vzorec PET: <https://publi.cz/books/180/18.html>

Obrázek 6. Celosvětová roční produkce plastů od roku 1950 do roku 2021 v milionech tun: <https://www.statista.com/>

Obrázek 7. Vyhozený plastový respirátor v životním prostředí, využívaný při pandemii Covidu-19: Pavlína Heřmanová

Obrázek 8. Mořská želva konzumující plastový sáček: <https://www.ca-wrecycles.org/recycling-news/turtlebags>

Obrázek 9. Plastový odpad na poli K.Perná

Obrázek 10. Nález mikroplastů v pitné vodě: <https://www.ih.cas.cz/tiskova-zprava/>

Obrázek 11. Bioasimilace- transport přes buněčnou membránu: Kumari, A.; Chaudhary, D.R.; Jha, B. Microbial Degradation of Plastics and Its Biotechnological Advancement. In Environmental Biotechnology; Gothandam, K.M., Ranjan, S., Dasgupta, N., Lichtfouse, E., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; Volume 3, pp. 1–30, ISBN 978-3-030-48973-1.

Obrázek 12. *Pseudomonas fluorescens*: <http://id.eaufrance.fr/par/1978>

Obrázek 13. *Pseudomonas aeruginosa*: https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:P.aeruginosa_scanning_3.jpg?fbclid=IwAR290B-lqN8BYX6qSqIE-aUn-KLy0QhoE_UFhaLl1vjbNbUduDIVQPnEMBdE

Seznam tabulek

OBJ

Tabulka 1: Přehled nejvýznamnějších druhů plastů.....	11
Tabulka 2: Rozklad plastů houbami.....	36

Seznam použitých zkratek

MP – MIKROPLASTY

NP – NANOPLASTY