

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Adéla Šimáková

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická

Biodegradace plastového odpadu

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adéla Šimáková**  
Osobní číslo: **C21227**  
Studijní program: **B3912 Speciální chemicko-biologické obory**  
Studijní obor: **Zdravotní laborant**  
Téma práce: **Biodegradace plastového odpadu**  
Téma práce anglicky: **Biodegradation of Plastic Waste**  
Zadávající katedra: **Katedra biologických a biochemických věd**

## Zásady pro vypracování

Zpracujte literární rešerši na dané téma bakalářské práce. V rešerši se zaměřte na:

1. Rozdělení plastů (přírodní, syntetické)
2. Vlastnosti plastů a hlavní zdroje plastového odpadu
3. Působení plastů na lidské zdraví
4. Dopad používání plastů na životní prostředí
5. Možnosti degradace plastového odpadu (bakteriální, plísňové a další)

Zhodnoťte jednotlivé metody likvidace plastových obalů.

Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 ve znění dodatku č. 2 "Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací".

Rozsah pracovní zprávy: **25 s.**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Podle pokynů vedoucí bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Iveta Brožková, Ph.D.**  
Katedra biologických a biochemických věd

Datum zadání bakalářské práce: **22. prosince 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2024**

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**doc. RNDr. Tomáš Roušar, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. února 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Biodegradace plastového odpadu jsem vypracoval(a) samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil(a), jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše. Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Adéla Šimáková

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala své vedoucí bakalářské práce Ing. Ivetě Brožkové, Ph.D. za odborné vedení práce, za trpělivost, za pomoc a za vstřícný přístup při zpracování této práce.

## **ANOTACE**

Práce je věnována degradaci plastů a popisuje jednotlivé fáze degradačního procesu plastů, kterým podléhá ve volné přírodě. Zabývá se zejména působením mikroorganismů na plasty se zaměřením na jednotlivé části procesu mikrobiální degradace. Zahrnuje pohled na současnou strategii zpracovávání plastů i případné alternativy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Biodegradace, mikrobiologická degradace, abiotická degradace, alternativy plastů, znečištění životního prostředí

## **TITLE**

Biodegradation of plastic waste

## **ANNOTATION**

The work deals with the degradation of plastics and describes the individual stages of the degradation process of plastics, which it is subjected to in the wild. It mainly deals with the effect of microbes on plastics, with a focus on individual parts of the microbial degradation process. It includes a look at the current plastics processing strategy as well as possible alternatives.

## **KEYWORDS**

Biodegradation, microbiological degradation, abiotic degradation, alternatives to plastics, environmental pollution

# OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Vlastnosti plastů a hlavní zdroje plastového odpadu.....	12
1.1 Vlastnosti plastů.....	12
1.2 Životní cyklus plastu.....	13
1.4 Nálezy v životním prostředí.....	15
2 Působení plastů na lidské zdraví.....	17
2.1 Působení ftalátů na lidský organismus.....	18
2.2 Působení BPA a BPA derivátů na lidský organismus .....	19
2.3 Působení ostatních často využívaných chemikálií v plastech.....	19
3 Degradace plastového materiálu .....	21
3.1 Vliv prostředí a materiálu .....	22
3.2 Fotochemická degradace.....	24
3.3 Hydrolytická degradace .....	25
3.4 Termální degradace.....	26
4 Mikrobiologická degradace plastů.....	27
4.1 Mechanismus mikrobiologické degradace plastového odpadu .....	28
4.1.1 Kolonizace .....	29
4.1.2 Biodeteriorace .....	30
4.1.3 Biofragmentace .....	31
4.1.4 Asimilace a mineralizace .....	31
4.2 Měření rychlosti biodegradace.....	32
4.3 Mikroorganismy schopné biodegradace .....	34
4.3.1 Bakterie degradující plasty .....	35
4.3.2 Ostatní biodegradující mikroorganismy .....	37
4.4 Biodegradace plastů v mořském prostředí.....	39
5 Současná řešení plastového odpadu.....	41



5.1 Sklárky .....	41
5.2 Spalování .....	41
5.3 Recyklace .....	42
6 Alternativy plastů.....	44
6.1 Bioplasty .....	44
6.1 Oxo-biodegradibilní plasty .....	45
ZÁVĚR .....	47
POUŽITÁ LITERATURA .....	48

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Životní cyklus plastů .....	14
Obrázek 2: Odpadky u vodní cesty v Indonésii .....	15
Obrázek 3: Průměrná přítomnost mikroplastů v balené vodě.....	16
Obrázek 4: Model přenosu aditiv, POPs a mikroplastů na lidi.....	17
Obrázek 5: Schéma degradace plastů .....	21
Obrázek 6: Vlastnosti plastu a prostředí ovlivňující degradaci plastu.....	23
Obrázek 7: Schéma hlavních stádií procesu biodegradace .....	27
Obrázek 8: Stupně mikrobiální degradace plastových polymerů .....	32
Obrázek 9: Skládka s plasty .....	43

## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

BPA – bisfenol A

BPS – bisfenol S

DDT – aromatická halogensloučenina (1,1,1-trichlor-2,2-bisethan)

ED – endokrinní disruptory

EG – etylenglykol

GHG – skleníkový plyn (greenhouse gas)

ICHS – ischemická choroba srdeční

LDPE – nízkohustotní (low density) polyetylen

PCBs – polychlorované bifenyly

PCL – polykaprolakton

PEF – polyetylenfumarát

PEK – polyeterketon

PET – polyethylentereftalát

POPs – perzistentní organické polutanty

PP – polypropylen

PS – polystyren

PSU – polysulfon

PUR – polyuretan

PVC – polyvinylchlorid

TPA – kyselina tereftalová

## ÚVOD

Plasty přinesly lidstvu velké výhody a umožnily některé z nejvýznamnějších pokroků moderní civilizace. Nyní je však jasné, že plasty jsou také zodpovědné za značné škody na lidském zdraví, ekonomice a životním prostředí Země.

Množství plastů a mikroplastů znečišťujících životní prostředí se rapidně zvyšuje v posledních letech. Odolnost těchto materiálů a jejich rozmanité chemické složení způsobuje významné problémy jak pro životní prostředí, tak pro lidské zdraví. Tyto heterogenní vlastnosti rovněž ztěžují možnosti generalizované recyklace a dalšího zpracovávání plastového odpadu.

Cílem této bakalářské práce je zjistit nejnovější poznatky z oboru zabývající se vlastnostmi plastů, vlivem plastů na lidské zdraví ale i kvalitu životního prostředí. Rovněž se zde budu zaměřovat na možné využití bakterií, hub a jiných mikroorganismů v degradaci plastového materiálu. V neposlední řadě popíši současné alternativy plastů a vyhlídky na budoucnost výzkumu biodegradace plastů.

# **1 Vlastnosti plastů a hlavní zdroje plastového odpadu**

Plasty jsou v dnešní době nezbytné pro mnoho aspektů každodenního života. Plasty mají mnoho využití; od zdravotnictví, technologií, stavebních prací až po textilní průmysl. Kvůli fyzikální a chemické rozmanitosti plastových polymerů se za ně jen obtížně hledá náhrada, která by splňovala všechna kritéria. Například v závislosti na druhu polymeru je možné zahřát, sterilizovat a jinak dále manipulovat s plastem, který si ponechává strukturní vlastnosti (Horton, 2022).

Plast jako materiál umožnil lidstvu mnoho důležitých pokroků, které utvářejí současnou podobu civilizace. Dnes je retrospektivně jasné, že plasty jsou odpovědné za významnou část poškození lidského zdraví, ekonomiky a životního prostředí (Landrigan a kol., 2023).

Plastový odpad tvoří přibližně 10 % komunálního odpadu, ale tvoří až 85 % drobného odpadu v moři, většina z toho pochází z pozemních zdrojů (Rhodes, 2018). Momentálně není zavedená dostatečně velká kontrola nad produkcí a likvidací plastů, zároveň chybí konsistentní celosvětová politika recyklování. S plastovými materiály tak může být špatně zacházeno a proto následně končí v ekosystémech (Azevedo-Santos a kol., 2021).

## **1.1 Vlastnosti plastů**

Plasty jsou komplexní, vysoce heterogenní syntetické chemické materiály. Přes 98 % plastů je produkováno z fosilního uhlíku, jako jsou ropa, uhlí a zemní plyn. Plasty se skládají ze základního uhlíkového polymeru a tisíce dalších chemikálií, které jsou inkorporovány do těchto polymerů za účelem získání dalších specifických vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří specifická barva, flexibilita, stabilita, odolnost materiálu vůči vodě a UV záření a další. Mnoho z těchto přidaných chemikálií mohou být vysoce toxické pro organismy (Landrigan a kol., 2023). Více než 4000 chemických aditiv je nyní používáno jen v plastových obalech jídla. V současnosti je na trhu více než 5000 různých typů plastů. Celkový počet využívaných aditiv v plastech tak musí být signifikantně vyšší (Zimmermann a kol., 2019).

Plasty jsou známé jako vysoce persistentní polutanty, a po jejich vypuštění do volné přírody jsou vystavovány procesům jako chemické zvětrávání, foto-oxidaci, biologické dekompozici a mechanickému opotřebení, které ovlivňují jejich strukturní integritu a ústí ve fragmentaci (Amato-Lourenço a kol., 2020; Tahir a kol., 2019).

Tyto fragmenty, neboli mikroplasty, zvětšují celkovou plochu plastu a zvyšují schopnost materiálu absorbovat a koncentrovat persistentní organické polutanty jako DDT a PCBs

(Rhodes, 2018). Rovněž absorbovat prvky jako je zinek, kadmium, nikl a olovo (Wright a kol., 2017). Mikroplasty pak mají větší potenciál přenést tyto látky do tkání zvířat, zejména v mořském prostředí (Rhodes, 2018).

Velikost a tvar odpadního materiálu jsou zásadní vlastnosti, které se musí monitorovat v posuzování znečištění. Oba tyto znaky mohou ovlivňovat chování odpadu v životním prostředí, včetně následné degradace, transportu a míry dopadu na životní prostředí. Plastové odpady mají široké rozmezí velikostí, od mikroskopických částic až po objekty o průměru několika metrů. Pro definici velikosti mikroplastů se využívá horní hranice o průměru  $< 5\text{mm}$  jako mez rozměru mikroplastů (Tahir a kol., 2019).

Mikroplasty mohou být rozděleny do dvou skupin dle původu; primární a sekundární. Primární mikroplasty jsou účelně vyráběny (např. v kosmetice, jako abrazivní částice, aj.) (Urbanek a kol., 2018). Sekundární částice vznikají důsledkem opotřebení nebo fragmentace větších materiálů během používání (např. textilní vlákna a lana, zvětrávání a fragmentace větších kusů odpadů aj.) (Tahir a kol., 2019).

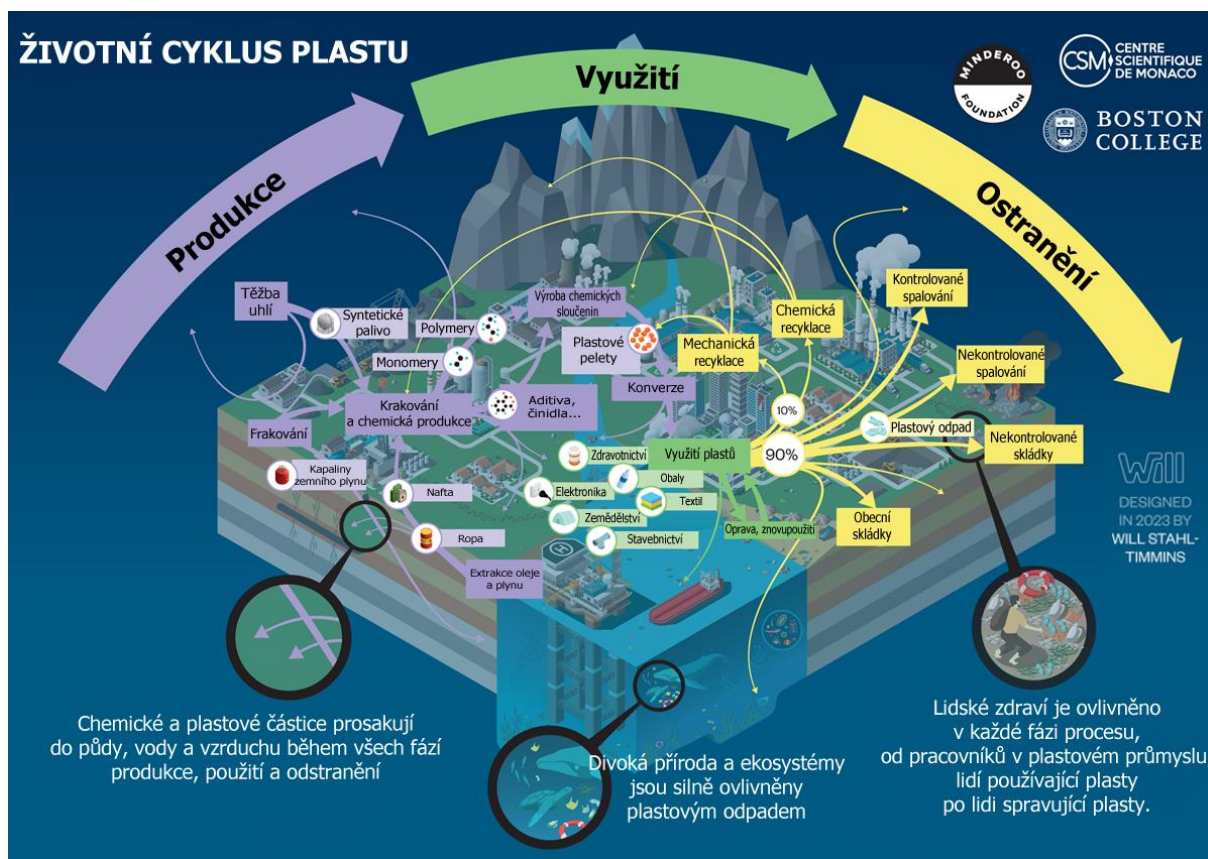
Plasty a mikroplasty jsou tak vysoce komplexní sloučeniny, které se liší ve fyzických a chemických vlastnostech jako jsou například chemické složení, průměr, tvar, hustota a barva aj. Sekundární mikroplasty ve volném prostředí jsou vystavovány vlivům vnějšího prostředí, což je nadále zvyšuje množství chemických i fyzikálních rozdílů mezi jednotlivými mikroplasty. Na plastech se rovněž mohou tvořit biofilmy, které se mohou stát vektorem pro mikroorganismy včetně těch patogenních (Amato-Lourenço a kol., 2020).

Toto komplexní složení znemožňuje generalizovat výsledky studií, které prozkoumávají jeden nebo několik typů plastů. Bylo proto ustanoveno, že různé typy plastů by měly být považovány za samostatné materiály (Landrigan a kol., 2023).

## **1.2 Životní cyklus plastu**

Životní cyklus plastů je složen ze tří částí. Nejprve nastává produkce plastu, který je využit ke svému účelu a následně odstraněn. Při produkci se fosilní paliva jako uhlí, ropa a zemní plyn transformují pomocí energeticky náročných katalytických procesů v různé typy produktů (Landrigan a kol., 2023). V této fázi se do plastu přidávají i různá aditiva, aby se dosáhlo ideálních vlastností polymeru. Mezi často využívaná aditiva patří zpomalovače hoření, UV stabilizátory, změkčovadla, barviva a lubrikanty (Tahir a kol., 2019). Jednorázové plasty jsou momentálně nejvyužívanějšími plastovými materiály, následované syntetickými vlákny a stavebninami. V současné době se pro odstranění použitého plastu nejčastěji využívají

skládky, ale také spalovny a recyklace (Landrigan a kol., 2023). Na obrázku číslo 1 jsou schematicky vyobrazeny jednotlivé části životního cyklu plastu včetně možných způsobů produkce, využití a následného odstranění.



Obrázek 1: Životní cyklus plastů (Stahl-Timmings, 2022, staženo a upraveno 16.05.2024)

Existují stovky různých typů polymerů a směsí polymerů, které jsou momentálně komerčně vyráběny, ale na trhu jsou nejčastěji plasty na bázi polyethylenu (HDPE a LDPE), polypropylenu (PP), polyvinyl chloridu (PVC), polyuretanu (PUR), polystyrenu (PS) a polyethylentereftalátu (PET). Těchto 6 polymerů tvoří zhruba 80 % celkové produkce plastů a nejspíše tvoří i část odpadu v životním prostředí. Plastové obaly jsou nejčastějším využitím pro plasty (36 %), následuje stavebnictví (16 %) a textil (15 %) (Tahir a kol., 2019).

Během pandemie v roce 2020 nastalo častější využívání jednorázových plastových materiálů a tím se i zvýšilo množství odpadu (Klemeš a kol., 2020). Odstraňování plastového odpadu je velmi neefektivní, hodnoty obnovení a recyklace jsou globálně pod 10 %. Je odhadováno, že se každoročně celkem 22 megatun plastového odpadu dostane do životního prostředí. Pokud k této hodnotě jsou připočteny i jednorázové materiály, pak se jedná o více než 6 gigatun plastů od roku 1950. Velké kvantity plastového odpadu jsou každoročně exportovány z bohatých zemí

do chudých zemí, kde se dále akumulují ve skládkách, znečišťují vzduch, vodu a degradují místní ekosystémy (Landrigan a kol., 2023). Na obrázku číslo 2 je fotografie nahromaděného plastového odpadu u vodní cesty v Indonésii.



Obrázek 2: Odpadky u vodní cesty v Indonésii (Thompson, staženo 18.04.2024)

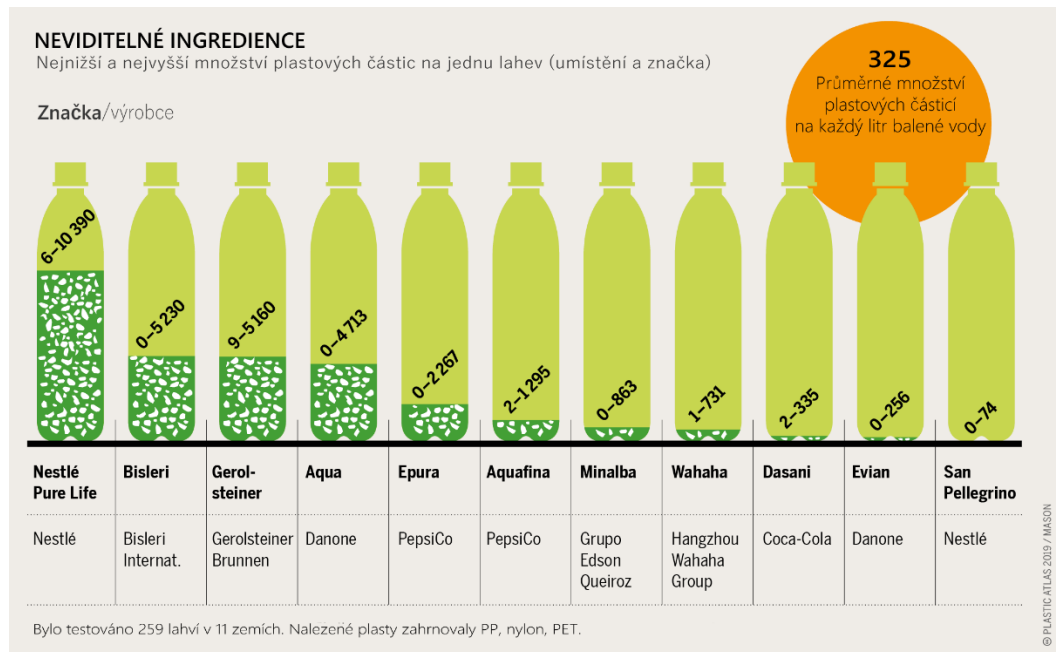
#### **1.4 Nálezy v životním prostředí**

Mikroplasty byly již nalezeny v lidských plicích i v půdě ve Švýcarských horách, tyto nálezy jsou pravděpodobně vzdušného původu (Rhodes, 2018). Hlavním zdrojem znečištění ovzduší mikroplasty je výroba a používání syntetického oblečení, spalování odpadů, skládky aj. (Amato-Lourenço a kol., 2020).

Častým výskytem mikroplastů jsou i vodní plochy a oceány. Mikroplasty byly i nalezeny v arktických ledovcích, jejichž původem jsou nejspíše mořské proudy odnášející znečištění od rybaření a lodní dopravy (Rhodes, 2018). Je odhadováno, že téměř 700 mořských druhů živočichů a přes 50 sladkovodních druhů živočichů vstřebaly, pozřely, nebo byly jinak ovlivněny mikroplasty (Lau a kol., 2020).



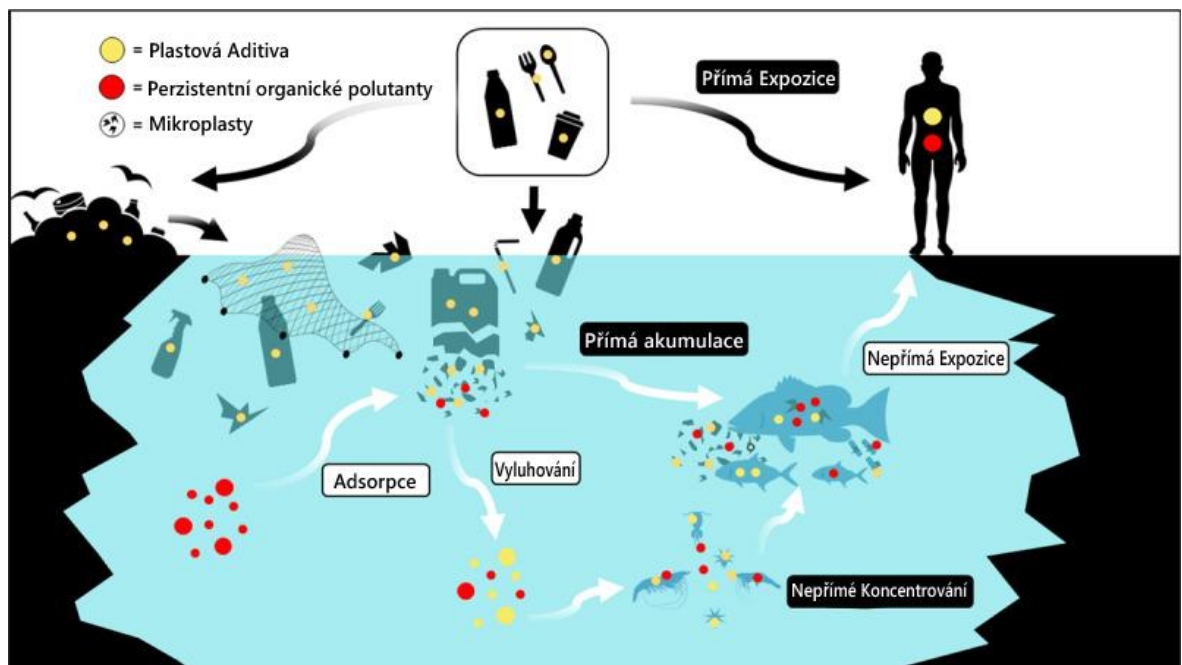
Je velmi pravděpodobné, že se mikroplasty do lidského organismu dostávají pomocí pitné vody. Při testování pitné vody v Evropě na mikroplasty bylo 72 % vzorků kontaminovaných mikroplasty a ve vzorcích pitné vody v USA bylo nalezeno 92 % vzorků kontaminovaných mikroplasty. Potraviny mohou být rovněž kontaminovány mikroplasty z plastových obalů (Rhodes, 2018). Na obrázku číslo 3 jsou znázorněny zjištěné obsahy mikroplastů v balené pitné vodě od různých výrobců.



Obrázek 3: Průměrná přítomnost mikroplastů v balené vodě (Böll-Stiftung, 2019, staženo a upraveno 16.05.2024)

## 2 Působení plastů na lidské zdraví

Mikroplasty mají škodlivé působení na organismy. Mezi ně mohou patřit akumulace v těle nebo v orgánech, obstrukce a zánět. Nejčastěji udávané efekty jsou ale spojovány s působením primárních mikroplastů, které byly vyrobeny v kontrolovaném laboratorním prostředí. Nemají tak stejné charakteristiky jako sekundární mikroplasty, které se vyskytují ve volné přírodě. Sekundární mikroplasty mají působením vnějšího prostředí nepravidelný tvar, rozdílné velikosti a chemické vlastnosti, a to i v rámci skupiny sekundárních mikroplastů (Amato-Lourenço a kol., 2020). Reálné dopady na zdraví živočichů tak mohou být odlišné než ty, které jsou uváděny v laboratorních výzkumech. Na obrázku číslo 4 je schematicky znázorněno, jak mikroplasty mohou ovlivňovat lidské zdraví přímou nebo nepřímou expozicí.



Obrázek 4: Model přenosu aditiv, POPs a mikroplastů na lidi (Takada a Brunner, 2023, staženo a upraveno 16.05.2024)

Bylo zjištěno, že pracovníci ve výrobě plastů mají zvýšené riziko výskytu leukémie, lymfomu, angiosarkomu jater, rakoviny mozku, rakoviny prsu, mezoteliomu, neurotoxického poranění a snížené plodnosti. Dělníci vyrábějící plastové textilie umírají ve zvýšené míře na rakovinu močového měchýře, rakovinu plic, mezoteliomu a intersticiální plicní onemocnění. Pracovníci recyklující plasty mají zvýšený výskyt kardiovaskulárních onemocnění, otravy toxickými kovy, neuropatie a rakoviny plic (Landrigan a kol., 2023).

Plod a malé děti mohou být častěji ovlivněny působením plastů, protože ranný vývoj je velmi citlivý na působení chemických látek. Expozice plodu a dětí plastům bývají spojeny se zvýšeným rizikem předčasného narození, narození mrtvého dítěte, nízké porodní hmotnosti,

vrozených vad reprodukčních orgánů, poškození nervového vývoje, zhoršeného růstu plic, a dětské rakoviny. Expozice chemikáliemi obsažených v plastech v raném věku také zvyšuje riziko výskytu nemocí později v životě (Landrigan a kol., 2023).

Zvířata žijí v prostředí, kde se momentálně běžně vyskytují mikroplasty, mohou je tedy konzumovat, pít v pitné vodě, a tak se běžně dostávají mikroplasty do jejich organismu. Plasty se v životním prostředí vyskytují v různých velikostech a takto se pak i dostávají do zvířecího organismu (v žaludku velryb nacházíme plastový odpad velkých velikostí, u menších organismů a zvířat se spíše vyskytují mikroplasty) (National Academies of Sciences, 2022).

Nebezpečí mikroplastů spočívá nejen v jejich schopnostech akumulace v organismu a vyvolávání zánětu, ale i v jejich chemickém složení. Řada aditiv a dalších látek přidávaných do plastů mají složení, které je toxické pro organismy. V určitých pevných plastech se mohou nacházet v relativně vysokých koncentracích (např. plasty používané ve výrobě elektroniky), což může znamenat potenciální zdravotní riziko, protože tyto aditiva mají schopnost narušovat endokrinní funkce. Složení plastů se postupem času vyvíjí, objevují se stále nové polymery, kopolymery a aditivní chemikálie. To znamená, že plasty vyrobené v letech 1950, 1960 a 1970 mají jiné složení než plasty vyrobené v posledních dekadách. Původně často používané pigmenty v plastech, jako kadmium, arsen, olovo, chrom a rtuť, se v současnosti akumulují v životním prostředí a mají na něj a na lidské zdraví neblahý vliv. V současnosti se vyrábí plasty s méně škodlivými aditivami a pigmenty (Tahir a kol., 2019).

## **2.1 Působení ftalátů na lidský organismus**

Ftaláty jsou nejčastěji využívaným změkčovadlem přidávaným do plastů, ale i do farmaceutických výrobků a kosmetiky. Je to zároveň jedním z nejvíce studovaných aditiv (Mariana a kol., 2023).

Ftaláty patří do skupiny endokrinních disruptorů (ED), které ovlivňují hormonální rovnováhu organismu. Mohou změnit vývoj a funkci hormonálně-dependentních tkání reprodukčního systému. Tyto změny hormonální rovnováhy mají významný dopad na reprodukční zdraví mužů (Hliseníková a kol., 2020). Ve studii, která se zabývala expozicí organismu ftalátům a koncentrací ftalátů v moči byla shledána spojitost mezi expozicí organismu ftalátům s výskytem ischemické choroby srdeční (ICHS) u sledovaných pacientů. Ve vzorcích moči pacientů s ICHS bylo naměřeno několik ftalátových metabolitů ve srovnání s kontrolními vzorky zdravých pacientů. Některé studie spojují expozici ftalátům se zvýšenou úmrtností na

kardiovaskulární onemocnění; při testování vzorků populace byla nalezena korelace mezi nálezem metabolitů ftalátů v moči a úmrtím z kardiovaskulárních příčin (Mariana a kol., 2023).

Živé organismy jsou v prostředí běžně vystavovány směsím ED v nízkých dávkách. Existuje několik způsobů, jak může být jedinec vystaven ftalátům, nejčastěji se jedná o inhalaci, požití nebo transplacentární přechod. Různé typy ftalátů na sebe vzájemně působí prostřednictvím rozdílných mechanismů, což může vést k synergickým, aditivním nebo antagonistickým zdravotním účinkům. Ftaláty uplatňují své fyziologické účinky spíše v nízkých dávkách než ve vysokých dávkách (Hlisníková a kol., 2020).

## **2.2 Působení bisfenolu A a jejich derivátů na lidský organismus**

Bisfenol A (BPA) je monomerní změkčovadlo a je jedno z nejvíce využívaných chemikálií na celém světě. BPA je využíván ve výrobě polykarbonátů, epoxidové pryskyřice ale i v mnoha jiných produktech (Vanderberg a kol., 2007). BPA byl nalezen ve volné přírodě, jídle, spotřebních produktech (jako je např. toaletní papír) i lidských biologických vzorcích (jako např. moč) (Ni a kol., 2022).

Lidé mohou být vystaveni účinku BPA pomocí inhalace, požití nebo vstřebání přes kůži. BPA je typickým kontaminantem životního prostředí i potravin. Jedná se o látku, která narušuje endokrinní funkci buněk. BPA je zároveň toxický vůči reprodukčním orgánům, imunotoxický, neurotoxický, negativně ovlivňuje vznik a vývoj rakoviny. (Ni a kol., 2022). BPA má rovněž estrogení, antiestrogení, androgení a antiandrogení účinky na organismus (Chen a kol., 2016).

Bisfenol S je derivát BPA je často používanou náhražkou za BPA v polymerech. Má obdobné efekty

na lidský organismus jako BPA, přičemž estrogení a antiandrogení účinky jsou výraznější než u BPA. BPS má zároveň potenciál působit jako estradiol na membránovém systému buněk, čímž ovlivňuje proliferaci, diferenciaci a apoptózu. Genotoxicita a cytotoxicita BPS je rovněž vyšší než u BPA (Chen a kol., 2016).

## **2.3 Působení ostatních často využívaných chemikálií v plastech**

Nejvíce pozornosti dostávají aditiva ftaláty a BPA, v plastech je přítomno i mnoho jiných chemikálií, například pouze v plastovém obalu bylo nalezeno více jak 4000 druhů. Mezi ně patří různé monomery, oligomery, polymery, změkčovadla, antioxidanty, pigmenty a apod.

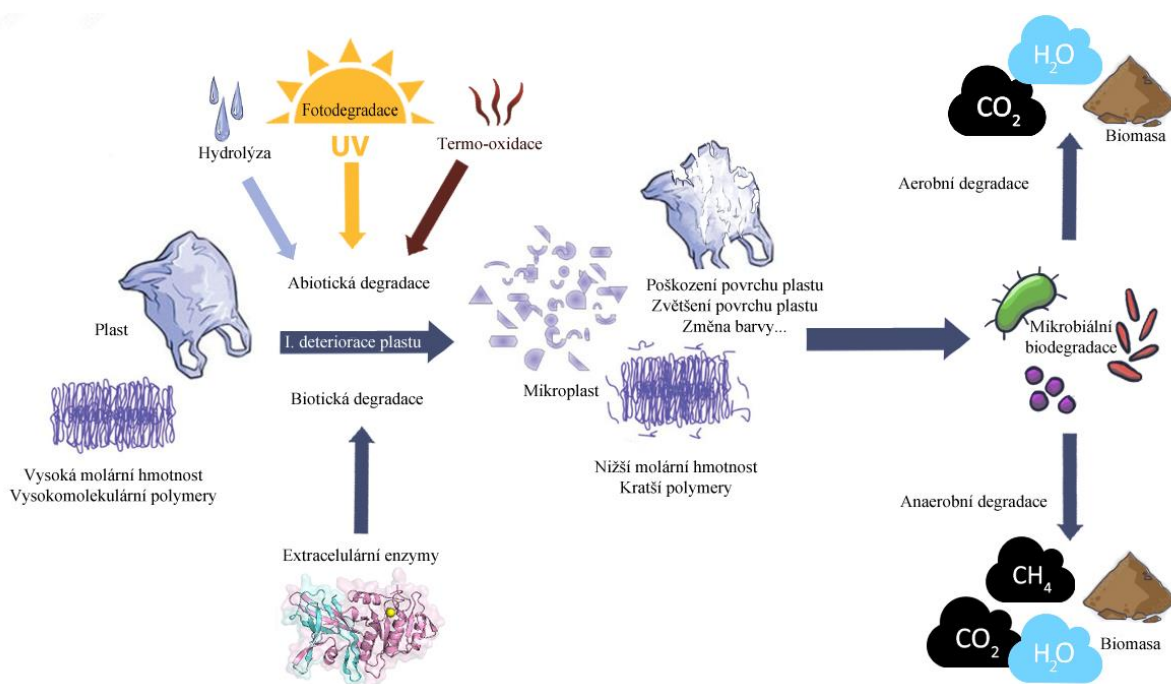
Zároveň se v plastech mohou nacházet nečistoty, neúčelně přidané látky, aditiva a látky vytvářející se během reakcí a chemického rozkladu během výroby (Zimmermann a kol., 2019).

Plasty mají schopnost vylučovat chemikálie v nich obsažené do okolí, které pak vyvolají *in vitro* reakce při styku s buňkami. Největší schopnost toxicity má PVC, jehož migrující toxiny spouštějí nespecifickou toxicitu. Nejvýraznější oxidativní stres na buňky mají LDPE 4 a PS 1, ale tuto schopnost má i většina ostatních druhů plastů. Tato schopnost vyvolat oxidativní stres se zvyšuje, pokud byl materiál vystaven slunečnímu záření. Kromě BPA mají i jiné materiály jako PVC schopnost vyvolat estrogenicitu a antiandrogenicitu. (Zimmermann a kol., 2019).

### 3 Degradace plastového materiálu

Plastový odpad může být degradován pomocí chemických a fyzikálních procesů (tj. abiotických), nebo pomocí biodegradace. Všechny tyto procesy určitým způsobem rozkládají chemické vazby v polymerech (Ali a kol., 2021).

Fotodegradace, hydrolytická degradace a termo-oxidativní degradace jsou nejčastější abiotické mechanismy degradace plastů v životním prostředí. Ve volné přírodě nejčastěji degradace plastů začíná fotodegradací, následované hydrolyzou a poté termo-oxidačním procesem. Všechny tyto procesy vedou ke štěpení vazeb uvnitř polymerů, což vede k rozpadu na nižší molekulární sloučeniny, které následně mohou být snáze metabolizovány mikroorganismy v procesu biodegradace. Tyto procesy jsou ale velmi zdlouhavé a mohou trvat až stovky let (Ali a kol., 2021). Na obrázku číslo 5 je znázorněno schéma degradace plastů.



Obrázek 5: Schéma degradace plastů (Wang a kol., 2020, staženo a upraveno 22.5.2024)

Velikou roli v degradaci plastu hraje i jejich složení. Stabilizátory jsou složka aditiv běžně přidávaných do plastových materiálů. Tato složka chrání plast před zvětráváním vlivem oxidace, ozonu, tepla, světla (včetně UV) a účinku mikroorganismů. Některé stabilizátory mají i více funkcí, jako ovlivňování flexibility a odolnosti materiálu. Jsou zabudovávány do struktury plastu během výroby ale i při finální formulaci produktu (Landrigan a kol., 2023). Některá aditiva v plastech jsou schopna naopak katalyzovat počáteční proces fotodegradace a oxidace (Booth a kol., 2017).

### 3.1 Vliv prostředí a materiálu

Proces degradace plastu záleží jak na vlivu prostředí, tak na chemických a fyzikálních vlastnostech daného polymeru. Náchylnost plastu k biotické i abiotické degradaci je přímo závislá na složení polymeru a délce řetězce. Například materiál jako PP, který má dlouhý uhlíkový řetězec je vysoce rezistentní vůči degradaci. Na druhou stranu polymery se zabudovanými heteroatomy (např. molekulami kyslíku) v řetězci jako PET nebo PU způsobuje větší vnímavost materiálu k biodegradaci a termální degradaci. Účinnost degradace je rovněž ovlivněna hydrofilitou látky, čím více hydrofilní je, tím snáze je materiál degradován (Ali a kol., 2021).

Rychlost degradace je také závislá na prostorové struktuře materiálu. Plasty jsou částečně krystalické, stupeň krystalinity plastu se pohybuje v závislosti na typu a složení mezi 10 % až 80 % a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, které jsou uloženy mezi amorfními oblastmi. Krystalické plasty mají pravidelnou strukturu, což ovlivňuje jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. Čím větší zastoupení krystalické mřížky, tím odolnější je materiál ale je i tím více křehký. Polymery s větším podílem krystalické struktury nepotřebují velké množství kyslíku a vody ke spuštění iniciační fáze degradačního procesu. Amorfní části plastů dodávají plastu flexibilitu a zároveň umožňují kyslíku a vodě snáze prostupovat hlouběji do nitra v porovnání s krystalickou strukturou. Amorfní části v polymerech jsou více labilní k termální degradaci v porovnání s krystalickými částmi, protože jsou více permeabilní k molekule kyslíku. V porovnání amorfní části degradují dříve a mnohem rychleji, než krystalické části polymerů (Booth a kol., 2017).

Vnější vlivy a podmínky rovněž ovlivňují mechanismus a rychlost degradace. Sluneční záření je nejdůležitější faktor. Se zvyšující se intenzitou záření se urychluje proces foto-oxidace a tím i rychlost degradace plastu (Ali a kol., 2021). Se zvýšenou teplotou a vlhkostí se rovněž urychluje degradace, protože se zvýší mobilita částic v polymeru, což následně ovlivní enzymatickou aktivitu mikroorganismů a také rychlost hydrolýzy. Odhaduje se, že každé zvýšení teploty o 10 °C způsobí zdvojnásobení rychlosti chemických reakcí a tím i zrychlení degradace plastu. Úroveň difúze kyslíku, volných radikálů a vody v polymeru jsou také ovlivňovány teplotou. Difúze těchto molekul je usnadněna ve vyšších teplotách, což vede k odpovídajícímu zvýšení množství chemických reakcí kvůli kyslíku a vodě, které difundují hlouběji do materiálu. Volné radikály jsou schopné se dostávat hlouběji do materiálu před tím než zreagují s polymery. Tyto procesy zvyšují plochu a množství polymeru ovlivněného degradací (Booth a kol., 2017).

Vysoká úroveň vlhkosti nad hladinou moře dokáže zlepšit vliv slunečního záření na degradaci. Některá aditiva ovlivňující degradabilitu jsou rozpustné ve vodě, takže po jejich uvolnění z polymerové struktury se rovněž může změnit rychlost degradace. Naopak redukce UV záření, ke kterému dojde v případě, že je plast hlouběji pod vodou, vede ke zpomalení procesu degradace (Booth a kol., 2017).

Množství kyslíku také ovlivňuje rychlost fotodegradace a biodegradace. Ve vyšších koncentracích kyslíku se úroveň degradace zrychluje. Množství vody a vlhkosti ve vzduchu je nezbytný faktor pro abiotický i biotický proces degradace. Mezi jiné faktory významně ovlivňující degradaci patří geografické umístění, klimatické podmínky, smog a jiné polutanty (Ali a kol., 2021). Na obrázku číslo 6 jsou uvedené jednotlivé faktory a vlastnosti materiálu ovlivňující rychlost a průběh degradace.



Obrázek 6: Vlastnosti plastu a prostředí ovlivňující degradaci plastu (Ali a kol. 2021, staženo a upraveno 22.05.2024)



### 3.2 Fotochemická degradace

Fotochemická degradace neboli fotooxidační degradace, je považována za nejdůležitější způsob abiotické degradace v aerobním prostředí (Ali a kol., 2021). Je mnohem efektivnější v degradaci plastu, než chemická degradace a nevyžaduje náročné podmínky pro to, aby nastala. Je vhodná pro degradaci různých typů plastů na menší fragmenty, molekuly a nakonec CO<sub>2</sub> (He a kol, 2023).

Fotochemická degradace je působení světla, zejména UV záření, ale i záření viditelného spektra (Manzoor a kol., 2022), na molekulovou a mikrostrukturální úroveň plastu a tyto změny se následně projeví i makroskopicky (Landrigan a kol., 2023). Toto záření způsobuje vznik volných radikálů v dlouhém řetězci uhlovodíků, což způsobí, že materiál ztratí některé své fyzikální vlastnosti a je pak lépe přístupný pro mikrobiální degradaci (Sowmya a kol., 2014). Ve správných podmínkách může sluneční záření degradovat plasty mnohem rychleji a snižovat tím délku života plastu ze stovek let na desítky let. Rychlá absorpce UV záření na povrchu limituje degradaci materiálu pouze na svrchní vrstvu o šířce 50 až 100 μm, proto je fotochemická degradace zejména povrchovým procesem (Landrigan a kol., 2023).

Mechanismus fotodegradace zahrnuje tři hlavní stádia a to iniciaci, propagaci, terminaci (Ali a kol., 2021). Při iniciační fázi probíhá ionizace polymeru pomocí UV záření a na molekulární úrovni se tím spustí řetězové štěpení, které snižuje molekulovou hmotnost polymeru (Zaaba a Jaafar, 2020). Pomocí oxidace se zároveň do struktury zabudovávají karbonylové a hydroxylové skupiny (Landrigan a kol., 2023) a také se vytvářejí volné radikály (Ali a kol., 2021). Pro iniciaci tohoto chemického procesu je potřeba, aby materiál obsahoval chromofory, které umožňují absorpci světelné energie. Několik typů plastů takové skupiny neobsahuje, jako například PE nebo PP, což tyto materiály činí odolnějším vůči fotodegradaci. Naopak určité nečistoty nebo abnormality ve struktuře umožňují snazší iniciaci. Během fáze propagace vzniklé polymerové radikály reagují s molekulami kyslíku za vzniku peroxy-radikálů. Rovněž mohou i nastat komplexní radikálové reakce což vede k auto-oxidaci. Tato fáze vede k štěpení vazeb polymeru a vzniku nových vazeb. Fáze terminace nastává, když zreagují dva radikály za vzniku inertního produktu (Ali a kol., 2021). Produkty fotooxidační degradace plastových polymerů jsou aldehydy, estery a propylové koncové skupiny na polymeru (Manzoor a kol., 2022).

Jedním ze způsobů jak odolné plasty (PE, PP aj.) fotodegradovat je využití různých typů fotokatalyzátorů. Nejúčinnější mezi nimi jsou oxidy kovů a to ZnO a TiO<sub>2</sub> za použití UV-C záření (He a kol., 2023).

Snížení molekulové hmotnosti vede ke změnám v prostorové mikrostruktuře plastu. Na úrovni mikrostruktur jsou plasty semi-krystalické látky. Působením fotochemické degradace se vytváří více krystalických struktur na povrchu plastu. Tento rozdíl mezi svrchní krystalickou vrstvou a spodní amorfni vrstvou vede ke zvyšování vnitřního stresu mezi těmito vrstvami. Pokud stres mezi vrstvami dosáhne kritické hranice, dojde k prasknutí a tím se zvyšuje drsnost a plocha materiálu (Landrigan a kol., 2023). Některé fotodegradované plasty (jako PVC, PS aj.) změni svou barvu na nažloutlou až oranžovou jako důsledek oxidace. To nastává při akumulaci degradačních produktů vznikajících při reakci nebo kvůli oxidaci stabilizátorů. Žluté zabarvení lze kvantifikovat pomocí kalorimetru a vyjádřit jako index žlutosti (Andrady, 2017)

Důsledkem fotochemické degradace je mnoho fyzických a chemických změn na úrovni molekul a mikrostruktur materiálu, které jsou důležité pro schopnost mikroorganismů interagovat s plasty (Landrigan a kol., 2023). Zvyšuje se hydrofilita plastu a tím je umožněna snazší tvorba biofilmu na povrchu polymeru (Ali a kol., 2021).

Skutečná účinnost fotodegradace na plasty a mikroplasty v životním prostředí je sporná, protože v současné době jsou pro laboratorní testy vybírány zejména primární mikroplasty a nikoliv sekundární z volné přírody (He a kol., 2023).

### **3.3 Hydrolytická degradace**

Hydrolýza plastů je jeden z hlavních kroků abiotické degradace. Její rychlost je závislá na náchylnosti polymerových vazeb vůči účinkům vody a také koncentraci vazeb uvnitř materiálu (Ali a kol., 2021).

Hydrolytická degradace je proces, během kterého dochází ke štěpení chemických vazeb ve struktuře plastu za účasti vody. Hydrolýza plastu je závislá na chemickém nebo biologickém katalyzátoru reakce (Ali a kol., 2021). Hydrolytické chemické reakce vytváří skupiny kyselin, které snižují pH a H<sup>+</sup> ionty, které urychlí další reakce (Zaaba a Jaafar, 2020).

Hydrolytická degradace zahrnuje difúzi vody, která začíná v amorfni částech plastu a způsobuje štěpení esterové vazby. Toto znamená, že více náchylné k hydrolýze jsou plasty, které mají ve své primární struktuře esterové vazby (jako například PE, PET aj.) (Zaaba a Jaafar, 2020).

Tento typ degradace ústí ve stejné fyzikální a chemické změny jako v degradaci fotochemické a to; redukce molekulové hmotnosti, vznik nových funkčních skupin, zvýšení krystalinity, zvýšení křehkosti a hydrofility, zvětšení povrchu a drsnosti. Společně se změnami ve struktuře plastu se při hydrolytické degradaci uvolňují z polymerů různé látky, jako například ve vodě rozpustná aditiva nebo sekundární mikroplasty. Čas potřebný pro hydrolytickou degradaci plastového polymeru se liší v závislosti na chemickém složení (Landrigan a kol., 2023).

### **3.4 Termální degradace**

Výsledky termální degradace jsou stejné na chemické i fyzikální úrovni jako u degradace fotochemické. Rozdíl je ve fázi iniciační. Místo působení UV světla je to termální energie, která vytváří volné radikály (Landrigan a kol., 2023).

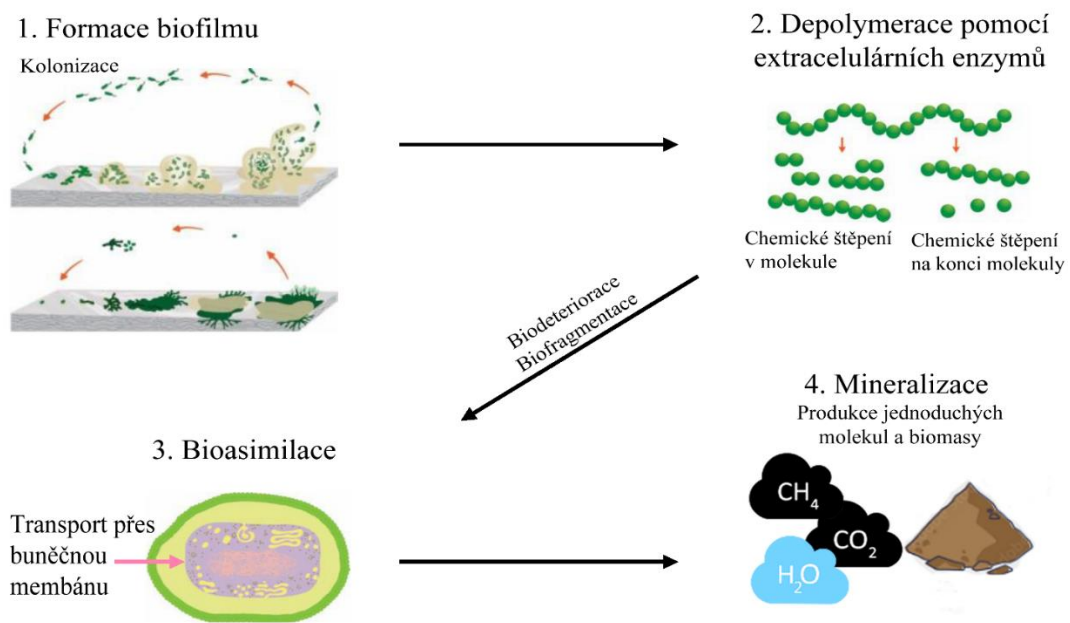
Termální degradace plastu probíhá za vyšších teplot v závislosti na typu a charakteristice polymeru, obvykle se jedná o teplotu vyšší než 100 °C. Určitá aditiva, která mají funkci antioxidantů, brání tvorbě radikálů a tím i degradaci za nižších teplot. Naopak je termální degradace urychlována tlakem a vystavováním reaktivním látkám jako je ozon (Ali a kol., 2021).

Obecně je resistance k degradaci spjata s chemickým složením polymeru. PP, PVC apod. jsou více náchylné k termální degradaci na rozdíl od PSU, PEK a silikonu, které jsou rezistentní vůči termální degradaci díky silným vazbám v jejich polymerní struktuře. Všeobecně je ale termální degradace považována za zanedbatelnou, zejména ve chladných a mořských prostředích (Ali a kol., 2021).

## 4 Mikrobiologická degradace plastů

Biodegradace je rozklad plastů zapříčiněný činností živých organismů, zejména mikroorganismů, jako jsou mikroorganismy a houby (Booth a kol., 2017). Tento proces zahrnuje degradaci polymerů zvýšením jeho plochy, což umožní tvorbu biofilmu nebo snížením molekulové hmotnosti polymeru (Manzoor a kol., 2022), což následně usnadní další zpracovávání plastů bakteriemi.

Nejprve je nutné definovat termíny biodegradabilita a biodegradace plastů. Biodegradabilita je potenciál plastu být degradován biologickými procesy. Biodegradace je systém popisující transformaci plastů způsobenou mikrobiální činností a jehož rychlost je závislá na podmínkách okolního prostředí. Biodegradabilitu lze tedy chápat jako předpoklad pro to, aby biodegradace nastala, ale nevypovídá nic o tom, zda k ní v daném prostředí dojde, ani o rychlosti přeměny plastů (Landrigan a kol., 2023). Na obrázku číslo 8 je vyobrazené schéma biodegradace plastu.



Obrázek 7: Schéma hlavních stádií procesu biodegradace (Haider, a kol., 2018, staženo a upraveno 16.05.2024)

Nejdříve dojde k formaci biofilmu, bakterie v daném biofilmu následně svými extracelulárními enzymy katalyzují štěpení chemických molekul v polymeru. Tyto procesy ústí v deterioraci a fragmentaci polymeru na menší částice, které je následně buňka schopná transportovat přes buněčnou membránu, kde je mineralizuje a asimiluje za vzniku energie.

Biodegradace zahrnuje zejména funkci enzymů, které katalyzují přeměnu plastů na menší molekuly monomery (Thew a kol., 2023). Mikroorganismy jsou ideálními kandidáty na dekontaminaci životního prostředí, protože mají schopnost syntetizovat právě tyto enzymy

a díky jejich malé velikosti se mohou dostat do kontaktu s celým povrchem plastu. Mikroorganismy jsou schopné využít plasty a jiné environmentálně škodlivé chemikálie jako zdroj živin (uhlíku) a energie (elektronů) (Cf a kol., 2021).

Abiotické procesy připravují plasty pro biotickou degradaci pomocí zkracování délky polymerů a zabudování méně stabilních funkčních skupin do těchto řetězců (Landrigan a kol., 2023). Tato ztráta fyzické integrity způsobuje lepší přístupnost povrchu pro mikroorganismy, které se následně snáze uchytí a mohou kolonizovat povrch. Formování a složení biofilmů je ovlivněno druhem plastu a okolním prostředím (Urbanek a kol., 2018). Na druhou stranu mikroorganismy mohou znesnadnit až znemožnit abiotickou degradaci (např. biofilmy znemožňují přístup UV světla) (Landrigan a kol., 2023).

V současnosti nejčastěji vyráběné plasty (např. PE, PP, PS, PVC a PET) jsou pokládány za persistentní polutanty (non-biodegradabilní), které se pouze těžko rozkládají ve volné přírodě. Tyto polymery tvoří v současnosti většinu znečištění životního prostředí. Jejich biodegradace je velmi pomalá až zanedbatelná z hlediska krátkodobé degradace (v rámci dekád). Hlavním důvodem pro takto pomalou biodegradaci plastů je pevnost materiálu a také inertnost dlouhých polymerních molekul. Jsou také více rezistentní vůči účinku mikroorganismů, jelikož jsou z evolučního hlediska poměrně nové a příroda zatím nedokázala vyvinout nové enzymy schopné rozkládat tyto syntetické polymery (Booth a kol., 2017).

Mikroorganismy mají rovněž přístup pouze k povrchu plastu, proto je degradace v hlubších vrstvách nepravděpodobná. Dlouhé polymery plastů normálně nedokáží prostoupit buněčnou membránou a vstoupit do buňky, kde by mohly být zpracovány metabolickými procesy buňky (Booth a kol., 2017).

Měření rychlosti degradace a mineralizace plastů je obtížné, kvůli zdoluhavému procesu degradace polymerů na menší molekuly, aby mohly být transportovány přes buněčnou membránu a následně mineralizovány na biomasu, CO<sub>2</sub> aj. Většina způsobů měření desintegrace plastového materiálu se tak specializuje na měření snadněji detekovaných změn jako je například ztráta hmoty plastového vzorku. Analýzu lze provádět nepřímo pomocí zkoumání aktivity mikroorganismů jako měření rychlosti růstu kolonií, tato metoda slouží pouze jako orientační (Booth a kol., 2017).

#### **4.1 Mechanismus mikrobiologické degradace plastového odpadu**

Proces biodegradace označuje přeměnu organických sloučenin v bioplyn a zbytkovou biomasu jako výsledek aktivity mikroorganismů, které dokáží využít plasty jako zdroj uhlíku pro syntézu

buněčné stěny (Ali, 2021). Jakákoliv změna v polymerové struktuře způsobena mikrobiální aktivitou je považována za biodegradaci. Může se jednat o snížení molekulové hmotnosti a jiné fyzikální a chemické změny (Pathak, 2017). Syntetické plasty jako PES, polyvinyl, polyamid a PU představují nejčastěji využívané plastové materiály na celém světě. Pouze malá část z odpadu těchto druhů plastů může být biodegradována kvůli charakteristikám těchto materiálů, jejich chemickým a fyzikálním vlastnostem a také faktu, že se nejedná o materiály vhodné k růstu mikroorganismů. Enzymatická degradace plastu může probíhat pomocí navázání enzymu na polymer, čímž se katalyzuje hydrolytické štěpení na oligomery, dimery a monomery. Sloučeniny jsou následně mineralizovány na CO<sub>2</sub> a vodu. Celulóza a lignin jsou přírodní polymery, které se snadno degradují na rozdíl od syntetických polymerů jako PE a PU, které jsou vůči degradaci rezistentní (Ali, 2021).

Biodegradace vyžaduje takové chemické vazby a mikrostrukturální vlastnosti plastů, aby je bylo možné rozštěpit a modifikovat enzymy. Například chemické vazby, které je možné štěpit hydrolyticky nebo vazby, které jsou náchylné k reaktivnímu kyslíku (Landrigan a kol., 2023). Mezi enzymy umožňující biodegradaci patří peroxidáza, lakáza, mangan superoxidodismutáza, alkanhydroxyláza (Shiwei a kol., 2024), ale také lipázy, esterázy, karboxylesterázy a kulinázy (Chen a kol., 2018)

Mezi další faktory ovlivňující náchylnost plastu k biodegradaci patří dostupnost a množství enzymů, přítomnost místa citlivého na dané enzymy a přítomnost koenzymu (Manzoor a kol., 2022).

Mikrobiální degradace plastového odpadu se skládá z pěti hlavních kroků a to kolonizace, biodeteriorace, biofragmentace, asimilace a mineralizace (Shiwei a kol., 2024; Pathak, 2017; Ali a kol., 2021). Metabolity vytvořené během procesu biodegradace jsou netoxické a do životního prostředí se dostávají přes různé biochemické cykly mikroorganismů (Manzoor a kol., 2022; Pathak, 2017).

#### 4.1.1 Kolonizace

Prvním krokem biodeteriorace je kolonizace povrchu plastu mikrobiálními kmeny. Během této fáze mikroorganismy přítomné na povrchu vytvoří společenství, což vede ke vzniku biofilmu, které dále vytváří změny na povrchu plastu a poškozuje ho (Ali, 2021). Jedná se o dynamický proces, který většinou zahrnuje adhezi, sekreci extracelulárních substancí a mikrobiální proliferaci (Shiwei a kol., 2024). Mikrobiální deteriorace je mnohem účinnější ve společenství různých mikroorganismů než ve společenství jednoho druhu bakterií. Roli v adhezi

mikroorganismů na povrchu plastu hrají různé vylučované proteiny a polysacharidy, které se infiltrují do pórů materiálu, což vede ke změně velikosti daných pórů (Ali a kol., 2021). Pro mikrobiální uchycení jsou vhodnější chemicky citlivé polymery (Urbanek a kol., 2018). Diverzita mikroorganismů na plastových biofilmech je silně ovlivněna environmentálními faktory. Nejčastějšími druhy na povrchu PS a PU plastů v Atlantském oceánu jsou *Chitinophagaceae*, *Xanthobacteraceae*, *Hyphomicrobiaceae*, *Pseudoalteromonadaceae*, *Opitutaceae*, a *Burkholderiaceae*. Struktura přítomných mikrobiálních biofilmů se liší podle regionu, kde se nachází, ale může se lišit i v rámci oblastí ve stejném regionu (Shiwei a kol., 2024).

#### 4.1.2 Biodeteriorace

Dalším krokem degradace polymeru je biodeteriorace, což je důsledek adheze a aktivity mikroorganismů na povrchu plastu. Během této fáze nastává degradace povrchu materiálu a tím se mění chemické a fyzikální vlastnosti plastového polymeru. Rychlost penetrace může být zvýšena pomocí extracelulární sekrece látek mikroorganismy, které ovlivňují hydrofobitu a hydrofilitu materiálu. Tyto extracelulární látky urychlují degradaci a akumulaci polutantů, které následně urychlují růst mikrobiálních kolonií (Ali a kol., 2021).

Chemolitotrofní mikroorganismy jako *Nitrosomonas* sp., *Nitrobacter* sp. a *Thiobacillus* sp. mohou vylučovat aktivní chemické sloučeniny jako jsou kyselina sírová a kyselina dusičná. Mikroorganismy využívající chemické vazby v organických substrátech a/nebo kyslík jako zdroj energie (chemo-organotrofní bakterie) mohou vylučovat organické kyseliny (např. kyselinu glukonovou, šťavelovou, glyoxylovou, citronovou, oxaloctovou, glutarovou aj.). Při této metabolické aktivitě mikroorganismů a jejich tvorbě kyselin a zásad se mění pH média, což může vést k další erozi povrchu plastového materiálu. Účinnost anorganických kyselin je v biodegradaci mnohem nižší než účinnost organických kyselin. Organické kyseliny jsou nutné pro dokončení procesu biodeteriorace (Ali a kol., 2021).

Teplota má rovněž vliv na rychlost biodegradace, ale pouze v rozsahu tolerovaným mikroorganismy. Jeho rychlost se rovněž zvyšuje s vyšší teplotou. Teplota ovlivňuje i mobilitu řetězce polymeru, což následně zvyšuje aktivitu enzymů během degradace. Se zvýšenou teplotou se zvyšuje i mobilita polymeru a je snazší pro enzym nalézt a připojit se na vazebné místo na správné chemické skupině řetězce polymeru (Booth a kol., 2017).

Do enzymatické biodeteriorace se zapojuje řada extracelulárních enzymů jako například peroxidázy. Avšak některé více krystalické plastové polymery jsou rezistentní vůči degradaci

a to například PU a PVC. V tomto případě mají mikroorganismy tendenci produkovat jiné enzymatické skupiny jako lipázy, esterázy, ureázy a proteázy, aby překonaly krystalinitu polymeru (Ali a kol., 2021).

Fyzikální biodeteriorace může probíhat pomocí vláknitých mikroorganismů, jako například *Aspergillus* sp. nebo *Candida albicans*, které využívají mycelia pro vniknutí do nitra polymeru, zvětšují velikost pórů a způsobí vznik prasklin, což vede ke snížené rezistenci a odolnosti polymeru (Ali a kol., 2021).

#### 4.1.3 Biofragmentace

Dalším krokem degradace plastů po biodegradaci je biofragmentace. V tomto procesu mikroorganismy využívají různé mechanismy pro štěpení polymeru, včetně vylučování specifických enzymů jako oxidoreduktázy, hydrolázy a/nebo volných radikálů (Ali a kol., 2021).

Produkcí různých látek a enzymů mikroorganismy redukují molekulární hmotnost polymerů na menší molekuly dimerů a monomerů (Silva a kol., 2023).

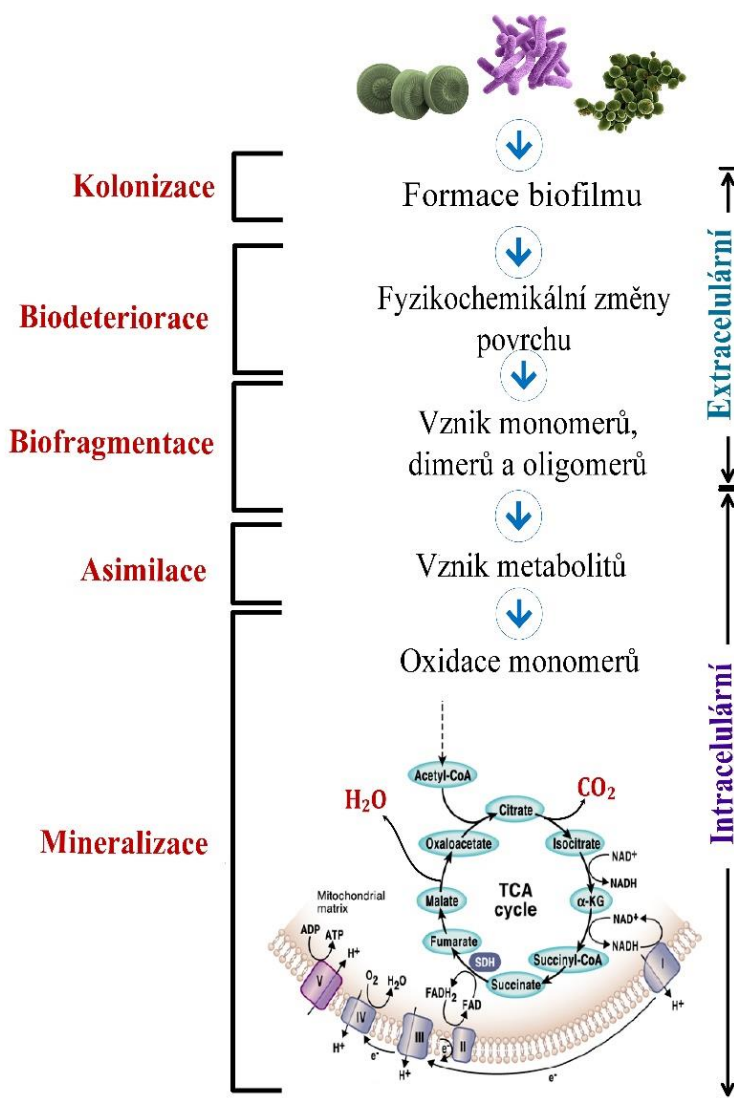
Chemické vazby v plastových polymerech jsou podobné vazbám v přirozeně se vyskytujících polymerech jako jsou lignin a celulóza. Je proto předpokládáno, že většina enzymů degradujících tyto polymerové sloučeniny by měla být schopna degradovat i syntetické plastové polymery. Mikrobiální endo- a exo-enzymy zúčastněné v biofragmentaci ale nejsou syntetizovány ihned, trvá poměrně dlouhou dobu, než se spustí buněčné procesy vedoucí k syntéze enzymů. Vzhledem k hydrofobní krystalické povaze polymeru mohou být reakce štěpení polymerního řetězce komplikované, reakce tedy vyžaduje zapojení více enzymů k transformaci struktury polymeru. Koncentrace enzymů se zvyšuje s časem a aktivita enzymů je ukončena se snížením koncentrace substrátu (Ali a kol., 2021).

#### 4.1.4 Asimilace a mineralizace

Proces biodegradace je dokončen asimilací a mineralizací. Buňka získává zdroj energie z monomerů, které získává z přechodí degradace a fragmentace. Tyto monomery umožňují buňce růst a slouží jako zdroj energie. Některé monomery se dostanou přes buněčnou membránu pomocí specifických přenašečů, jiné molekuly jsou moc velké a nemohou být asimilovány kvůli semi-permeabilitě membrány. Uvnitř mikrobiální buňky se degradované monomery oxidují využitím mikrobiálních katabolických cest, výsledkem jsou pak buněčné orgány a energetické molekuly jako ATP, který je dále využit třemi způsoby; aerobní respirace, anaerobní respirace a fermentace (Ali a kol., 2021). Nejčastěji buňka využívá



mechanismy  $\beta$ -oxidace a citrátový cyklus pro zdroj energie (Shiwei a kol., 2024). Biomasa,  $\text{CO}_2$  a voda jsou produkty aerobní asimilace, metan  $\text{CH}_4$  je produktem anaerobní asimilace (Sciscione a kol., 2023). Na obrázku číslo 9 je schéma jednotlivých fází biodegradace plastů.



Obrázek 8: Stupně mikrobiální degradace plastových polymerů (Ali a kol., 2021, staženo a upraveno 18.04.2024)

Biodegradace ústí v mnoho stejných fyzických a chemických změn jako v abiotické degradaci; redukce molekulové hmotnosti, vznik nových funkčních skupin, zvýšení krystalinity, redukce mechanických vlastností, zvýšená křehkost, zvětšený povrch, zdrsňelost a zvýšená hydrofilita plastu. Společně s těmito procesy mohou mikroorganismy navíc degradovat organická aditiva, metabolizovat produkty rozpustné ve vodě a zpracovat polymer na  $\text{CO}_2$  a jiné látky (Landrigan a kol., 2023).

## 4.2 Měření rychlosti biodegradace

Biologickou odbouratelnost polymeru ovlivňuje několik proměnných. Například okolní teplota, vlastnosti půdy a vody (vlhkost, teplota, pH, úroveň kyslíku a živin), různorodost

mikroorganismů v prostředí a fyzikálně-chemické vlastnosti plastu (plocha povrchu, chemické složení, molekulární hmotnost, krystalinita) (Baidurah, 2022).

Měření rychlosti biodegradace dle norem zahrnuje dvě kategorie; testování metody degradace a ukazatel účinnosti biodegradace. První kategorie specifikuje způsob testování biodegradace v materiálu co nejbližší skutečným podmínkám. Způsoby měření se liší podle místa, kde se plastový odpad nachází. Druhá kategorie určuje způsob výpočtu nebo analýzy biodegradace. Oba parametry jsou nezbytné pro objektivní posouzení biologické rozložitelnosti plastů (Silva a kol., 2023).

Mezi fyzikální metody měření biodegradace patří měření pevnosti polymeru za různých podmínek (např. měření pevnosti v tahu, poměr deformace aj.). Měření pevnosti tahu je nejvyšší možné napětí, které polymer dokáže vydržet před prasknutím. Tato schopnost se bude snižovat s progresí degradace (Baidurah, 2022).

Další metodou je měření úbytku hmotnosti materiálu. Jedná se velmi jednoduchou a nejčastěji využívanou metodu. Metoda spočívá v měření rozdílu hmotnosti materiálu před a po provedení testu biodegradace (Baidurah, 2022).

Další velmi často využívanými metodami jsou respirometrické techniky. Respirometrické techniky mohou být definovány jako nepřímé způsoby měření respiračního metabolismu mikroorganismů (Baidurah, 2022). V mezinárodních standardech se používají k posouzení úplné biodegradace podle rychlosti přeměny organického uhlíku na CO<sub>2</sub> a/nebo CH<sub>4</sub>, biomasu a další složky. Výsledky tohoto testu jsou pouze platné, je-li polymer jediným zdrojem uhlíku pro mikroorganismy. Dále je možné použít měření růstu biomasy, ke kterému dochází v důsledku procesu mineralizace. Toto měření je užitečné pouze ve vysoce kontrolovaných laboratorních prostředích, kde je polymer jediným zdrojem uhlíku pro růst mikroorganismu (Sciscione a kol., 2023).

Mezi další často využívané metody patří chromatografie, specificky GC plynová chromatografie s hmotnostní detekcí a další (Baidurah, 2022). Další techniky jako kapalinová chromatografie-hmotnostní spektrometrie (LC-MS), gelová permeační chromatografie (GPC), nukleární magnetická rezonance (NMR) a Fourierova transformační spektroskopie (FT-IR) mohou být také použity ale pouze jako doplňkové metody (Sciscione a kol., 2023).

### 4.3 Mikroorganismy schopné biodegradace

Zájem o schopnost bakterií, hub, aktinomycet a řas přirozeně enzymaticky degradovat polymery se zvýšil v posledních letech. Biotická degradace zahrnuje chemickou (enzymatickou, hydrolytickou, oxidativní) a mechanickou degradaci. Byly již identifikovány mikrobiální enzymy degradující PUR, PE, PS a nylon (Landrigan a kol., 2023). Mechanismus jejich funkce zahrnuje deterioraci (fragmentaci povrchu), biofragmentaci (pomocí extracelulárních enzymů a volných radikálů), asimilaci (aktivní a pasivní transport přes membránu) a mineralizaci (konečné produkty biodegradace jsou CO<sub>2</sub>, kyselina octová a lipidy) (Shiwei a kol., 2024).

Mikroorganismy jsou schopné degradovat odolné materiály jako lignin a olej, ale v rychlosti degradace jsou velmi rozdílné. Mikroorganismy mohou degradovat plasty hydrolyticky, oxidačně a enzymaticky. Společně tyto procesy vedou k degradaci polymeru, oxidaci a vzniku nových koncových funkčních skupin. Biodegradace je, stejně jako abiotická degradace, proces závislý na teplotě, pH, typu polymeru a krystalinitě rozkládaného materiálu. Mimo jiné je závislý na okolních podmínkách jako je množství živin, množství zdrojů uhlíku (který je více labilní a lépe dostupný, než uhlík z polymerů), ale i na molekulární hmotnosti plastu, rozměru plastové částice. Jedna z důležitých podmínek je, jaký druh mikroorganismů se v dané lokalitě nachází a jestli mají enzymy schopné rozkládat daný plastový polymer. Degradace může být extracelulární (sekrece enzymů do prostředí), nebo intracelulární pomocí buněčného metabolismu, pokud jsou plastové částice dostatečně malé a projdou buněčnou membránou (Landrigan a kol., 2023).

Různé faktory mohou usnadnit nebo inhibovat biodegradaci. Například přidání nutrientů jako škrob, kyselina palmitová a oxidace plastu kyselinou chlorovodíkovou, sírovou nebo dusičnou může urychlit degradaci, naopak některá aditiva plastů jako změkčovadla a zpomalovače hoření ji mohou inhibovat (Landrigan a kol., 2023).

V oblastech kontaminovaných plasty byly u jedné čtvrtiny testovaných mikroorganismů nalezeny enzymy schopné degradovat více druhů plastů jako například PET, PVA, PUR a PE. U některých mikroorganismů byly také nalezeny enzymy schopné degradovat ftaláty. Více druhů enzymů bylo v oblastech, které byly více znečištěné plasty než ostatní. Druhy enzymů se rovněž lišily dle místa nálezů, například enzymy degradující PUR byly nalezeny zejména v oceánských oblastech, naopak dvakrát více enzymů degradujících PET bylo nalezeno v půdě než v oceánu (Landrigan a kol., 2023).

#### 4.3.1 Bakterie degradující plasty

Bakterie jsou nejrozšířenější a nejhojněji se vyskytující organismy v přírodě. V posledních letech bylo izolováno mnoho bakterií degradujících plasty z prostředí jako moře, skládky, půda i komposty. Rychlost a schopnost degradace plastu se liší jak mezidruhově, mezírodově ale i podle místa, odkud byly organismy izolovány (Shiwei a kol., 2024). Druhů degradujících plasty je mnoho, následuje o výčet některých.

Rod *Idionella* je jeden z mikrobiálních kmenů schopných degradovat PET polymery. Jedná se o Gram-negativní kmen, který roste v pH 7-7,5 a teplotě 30-37°C. Druh *Idionella sakaiensis* je nejvýznamnějším zástupcem tohoto rodu. Tento druh byl izolován z Japonské skládky v roce 2016 a je schopný využívat PET jako svůj zdroj uhlíku (Walter a kol., 2022). PET je syntetický polymer složený z TPA a EG (Chen a kol., 2018). *Idionella sakaiensis* produkuje enzym podobný kutinázám, který byl pojmenován jako PETáza. Je velmi účinný v hydrolýze PET polymerů. (Chen a kol., 2018). Dalším klíčovým enzymem *Idionella sakaiensis* pro degradaci PET je MHETáza (Walter a kol., 2022).

Enzym PETáza produkovaný do okolí buňky nejdříve katalyzuje přeměnu PET na mono-2-hydroxyethyl tereftalát (MHET). Následně MHETáza v periplazmatickém prostoru hydrolyzuje MHET na původní edukty PET a to EG a TPA. Tyto látky jsou následně transportovány do cytoplasmy, kde jsou podrobeny citrátovému cyklu, ze kterého buňka získává energii (Walter a kol., 2022).

Rod *Pseudomonas* má schopnost degradovat různé typy polymerů. Dokáže degradovat i odolné polymery typu PE, PS, PP a jiné (Shiwei a kol., 2024).

*Pseudomonas aeruginosa* izolovaný ze střev potěmníků brazilských (*Zophobas morio*), byla schopná degradovat PE, PS, a polyfenylen sulfid (PPS). U tohoto druhu byla jako hlavní depolymeráza identifikována serine hydroláza (SH). *Pseudomonas aeruginosa* produkuje několik dalších typů depolymeráz, které mají vysokou afinitu k PE. Proto je tento druh velmi efektivní v degradaci PE polymeru (Lee a kol., 2020). Mezi další organismy schopné degradovat PE typ polymeru patří *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Rhodococcus*, *Staphylococcus* a další (Danso a kol., 2019).

Fragmenty produkované depolymerizací PE mohou být oxidovány pomocí dalších enzymů na mastné kyseliny a acetyl-CoA, které mohou být dále využity pro zdroj energie v  $\beta$ -oxidaci nebo citátovém cyklu (Lee a kol., 2020).

*Pseudomonas aeruginosa* je schopná degradovat i další polymery jako PS, PPS, ale kvůli rozdílným chemickým strukturám je za potřeby větší kombinace enzymů, což vede k různým stupňům účinnosti depolymerace (Lee a kol., 2020).

Jiné druhy *Pseudomonas*, jako je *Pseudomonas citronellolis*, *Pseudomonas alcaligenes* a *Pseudomonas fluorescens* jsou také schopné degradace různých typů plastů (Shiwei a kol., 2024).

I přes vysokou odolnost PU plastů k biodegradaci jsou určité druhy rodu *Pseudomonas* schopné degradovat právě tento polymer. Jedná se o druhy *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas cepacia*, *Pseudomonas protegens* a *Pseudomonas chlororaphis* (Wilkes a Aristilde, 2017). *Pseudomonas chlororaphis* je nejčastěji spojována s degradací PUR, protože produkuje specifické lipázy PueB a PueA které účinně hydrolyzují PUR. *Pseudomonas protegens* a *Pseudomonas putida* využívají obdobných mechanismů degradace PUR jako *P. chlororaphis* (Danso a kol., 2019).

Mikrobiální společenství kmenů *Pseudomonas* a *Bacillus* dokázalo růst synergicky v prostředí s PET polymery jako jediný zdroj uhlíku. Toto společenství rozkládalo PET na bis(2-hydroxyethyl) tereftalovou kyselinu (BHET), který byl nadále využíván mikroorganismy jako zdroj uhlíku. Produkované enzymy tohoto společenství byly schopné konvertovat veškerý BHET na metabolicky využitelné monomery TPA a EG a to mnohem efektivněji, než enzymy produkované z individuálních kultur *Pseudomonas* a *Bacillus* (Roberts a kol., 2020).

Rod *Bacillus* je dalším příkladem mikrobiálního rodu schopného štěpit různé typy polymerů. Jedná se o Gram-pozitivní tyčinku. Nejvýznamnějšími zástupci z tohoto rodu jsou druhy jsou *Bacillus cereus*, *Bacillus safensis*, a *Bacillus subtilis* (Shiwei, 2024).

*Bacillus cereus* je schopný produkovat enzymy lakázy a manganové peroxidázy, pomocí kterých je schopen degradovat PE na zdroj uhlíku a energie. *Bacillus cereus* izolovaný ze skládky Shivamogga v Indii byl schopný degradovat PE plast bez předchozích úprav. S úpravami povrchu plastu před zahájením biodegradace (UV záření aj.) ale degradoval PE mnohem efektivněji. Produktem působení lakáz a manganové peroxidázy *Bacillus cereus* byly aldehydy, alkoholy, karboxylové kyseliny, aromatické sloučeniny, alkeny a etherové skupiny (Sowmya a kol., 2014).

U rodu *Alcanivorax* byly rovněž zaznamenány enzymy schopné štěpit syntetické polymery. *Alcanivorax* sp. 24 izolovaný z mořského odpadu byl schopný degradovat jak nově vyrobené,

tak sekundární plasty na bázi PE. Degradace u tohoto druhu pravděpodobně začíná produkcí extracelulárních reaktivních forem kyslíku (ROS), které reagují s polymery za vzniku štěpení vazeb. Toto štěpení poskytuje velké rozpětí alifatických substrátů (alkany, alkyne, aldehydy, karboxyláty aj.), které *Alcanivorax* sp. 24 je schopný dále asimilovat pomocí hydroxylace polymerových zbytků (Zadjelovic a kol., 2022).

Dalším příkladem může být *Alcanivorax xenomutans* izolovaný z mangrovů, který byl schopný degradovat PS a byl při tom pozorován úspěšný růst kolonií (Shiwei a kol., 2024).

Rod *Rhodococcus* se také vyznačuje schopností depolymerizovat plasty. Enzymy, které nejčastěji využívají jsou lipázy a kutinázy (Zampolli a kol., 2024). Podle jedné studie mají bakterie rodu *Rhodococcus* podobnou degradační aktivitu proti PCL jako rod *Pseudomonas* (Urbanek a kol., 2017).

*Rhodococcus erythropolis* a *Rhodococcus opaticus* jsou schopné růst na PCL jako jediným zdrojem energie a uhlíku. Výsledkem rozkladu jsou karboxylové kyseliny a alkyly (Zampolli a kol., 2024).

*Rhodococcus ruber* YC-YT1 je jedním z mikroorganismů schopných degradovat estery kyseliny ftalové, které se využívají při výrobě aditiv. K tomuto procesu využívá hydrolázy, dekarboxylázy, hydroxylázy a následně beta-oxidační cyklus a citrátový cyklus (Yang a kol., 2018).

*Rhodococcus ruber* izolovaný z mangrovového sedimentu degradoval PP s 6,4 % ztrátou hmotnosti po 40 dnech inkubace. *Rhodococcus pyridinivorans* P23 izolovaný z hlubokomořského sedimentu po pěti týdnech kultivace snížil hmotnost PET o 4,28 % (Shiwei a kol., 2024).

Bakteriální degradace plastů je mnohem pomalejší než plastová degradace způsobená houbami, ale pro degradaci houbami je potřeba více stabilní podmínky než pro degradaci bakteriální (Ali a kol., 2021).

#### 4.3.2 Ostatní biodegradující mikroorganismy

Mimo využití bakterií, houby jsou dalším kandidátem na biodegradaci plastů. Rozsáhlý povrch houbového mycelia dokáže proniknout povrchem polymeru, a tak efektivně degraduje nejběžnější plastové polymery. V porovnání s bakteriemi, koncentrace enzymů vylučovaných houbami do okolí je významně vyšší (Ali a kol., 2021). Díky produkci enzymů jako kutinázy, lipázy, proteázy a lignolitické enzymy v přítomnosti prooxidačních iontů efektivně degradují

plasty na využitelné monomery (Srikanth, 2022). Vzniklé monomery mohou být asimilovány a mineralizovány intracelulárními enzymy hub (Ali a kol., 2021).

Rod *Aspergillus* je jedním z nejznámějších zástupců hub, které degradují plasty. Pro degradaci využívají zejména kutinázy, proteázy, esterázy a peroxidázy. *Aspergillus flavus* a *Aspergillus niger* produkují manganovou peroxidázu a lignin peroxidázu, které velmi účinně degradují LDPE (Srikanth, 2022). *Aspergillus flavus* je nejčastěji využívaným a nejvíce efektivním kmenem hub v degradaci plastů (Ali a kol., 2021).

*Aspergillus fumigatus* je schopný degradovat PVC. Pro sekreci specifických depolymeračních enzymů vyžaduje *Aspergillus fumigatus* vhodné podmínky pro růst, protože jinak může být ovlivněna jejich funkce (El-Dash a kol., 2023).

Mikrobiální společenství *Pseudomonas* sp. v a *Aspergillus niger* bylo testováno na schopnost rozkládat LDPE. Toto společenství bylo mnohem účinnější v rozkládání LDPE, než když byly kultury inkubované s polymerem samostatně. Během 60 dnů byla ztráta hmotnosti plastu 7,2 % pro *Pseudomonas* sp., 12,4 % pro *Aspergillus niger* a 15 % ve společenství (Ogunbayo a kol, 2019).

Některé další druhy *Aspergillus*, jako je *Aspergillus nomius* RH06 a *Aspergillus clavatus* JASK1, mohou účinně degradovat LDPE (Ali a kol., 2021).

Dřevokazné houby významně přispívají degradaci plastů i jiných polymerů díky jejich schopnosti produkovat několik extracelulárních enzymů jako lignin peroxidáza, manganová peroxidáza, polyvalentní (versatile) peroxidáza a oxidáza ze skupiny lakáz. Lakázy rozkládají lignin a přeměňují ho na CO<sub>2</sub> a vodu. Lignin je podobný syntetickým plastům v určitých vlastnostech jako hydrofobnost ale také v chemické struktuře. Jedná se o přírodní organický polymer, který může obsahovat etherové vazby obdobně jako u syntetického polymeru. Tato chemická podobnost umožňuje určitým enzymům modifikující lignin (jako jsou lakázy a manganové peroxidázy) degradovat plastové polymery jako jsou PE a PP (Ali a kol., 2021).

V minulosti již byla popsána biodegradace plastů pomocí hub s polyesterázovou aktivitou, která nastává výhradně u suchozemských hub. V současnosti již bylo izolováno i několik mořských hub degradujících plasty. *Penicillium* sp. izolované z pobřeží Rudého moře byly schopné adherovat k LDPE fóliím a úspěšně na nich růst. Významnou schopnost degradace plastů mají

i další druhy hub suchozemského původu, včetně *Trichoderma* sp., *Monascus* sp., *Clitocybe* sp., *Penicillium* sp., a *Phanerochaete* sp. (Shiwei a kol., 2024).

Dalšími organismy, které rozkládají plast jsou řasy. Řasy kolonizují povrch plastu a produkují ligninolytické a exopolysacharidové enzymy, které degradují plast. Bylo zjištěno, že řasa *Uronema africanum* izolovaná z kolonií na odpadních plastech ve sladkovodním jezeře degraduje LDPE fólie na základě pozorování koroze a abraze materiálu, které nastaly během 30 dní inkubace (Shiwei a kol., 2024). Modro-zelené řasy jako je *Anabaena spiroides* jsou schopné růst na povrchu PE plastů díky přítomnosti vhodných růstových faktorů jako jsou sluneční záření, vody a přítomnost různých živin (Ali, 2021). Sinice rovněž vykazují schopnosti degradovat plasty. Například *Phormidium lucidum* a *Oscillatoria subbrevis* izolované z plastového odpadu v domácí odpadní vodě jsou schopné degradovat LDPE. Jsou schopné kolonizovat PE a využívat uhlík z tohoto plastu bez jakýchkoli prooxidačních přísad nebo úprav polymerové struktury (Shiwei a kol., 2024).

#### **4.4 Biodegradace plastů v mořském prostředí**

Mikroorganismy jsou primárně odpovědné za biodegradaci plastů v mořském prostředí (Landrigan a kol., 2023). Většina naší planety je trvale chladná ( $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), protože více než 70 % Země je pokryto mořem, většinou hlubokým oceánem, z nichž dvě třetiny mají stálou teplotu přibližně  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bakterie jsou organismy schopné existovat i za těchto nepříznivých podmínek (Urbanek a kol., 2018). Plasty, které se dostanou do mořského prostředí jsou rychle kolonizovány místními mikroorganismy, což zapříčiní vznik biofilmů, a to vede k degradaci materiálu. Biofilmy vznikají již prvních pár týdnů po tom, co se plasty vyskytnou v moři (Booth a kol., 2017). V mořské vodě plast uvolňuje organický uhlík, čímž se stimuluje aktivita heterotrofních mikroorganismů (Urbanek a kol., 2018). Fotooxidační degradace je výrazně snížena, protože biofilm na povrchu chrání materiál před UV světlem. Mechanická degradace může být rovněž ovlivněna biofilmy, protože mikroorganismy požírají povrch materiálů, nebo tím, že mikroorganismy vylučují chemické sloučeniny ovlivňující stabilitu materiálu, který se pak stává křehčím. Schopnost materiálu se udržet na hladině rovněž klesá s množstvím biofilmu, což může způsobit to, že se materiál bude spíše potápět než držet na hladině moře (Booth a kol., 2017).

Environmentální a klimatické podmínky v jednotlivých mořských oblastech se mohou výrazně lišit v teplotě, množství světla, kyslíku, rozmanitosti bioty i mikrobiálních společenstvích. Tudíž se potenciální degradace plastů může velmi lišit v závislosti na životním prostředí a



geografické oblasti, v jaké se nachází. Obecně se za nižších teplot, méně světla, kyslíku a méně bioty zpomalí celkový proces degradace (Booth a kol., 2017). I přesto mikrobiální degradace plastů v mořském prostředí nastává, její rychlost je ale pomalá (Landrigan a kol., 2023).

Adaptace mikroorganismů na nové zdroje uhlíku může způsobit, že mikroorganismy začnou vytvářet nové enzymy, které jsou aktivní i za nižších teplot. Toto snížení teploty nutné pro enzymatickou aktivitu může být obrovskou výhodou v procesu degradace, protože se sníží spotřeba elektrické energie na ohřev materiálu. Potenciálně by tak mikroorganismy původem z chladných míst mohly být využity na degradaci odpadu na otevřených skládkách. Z významných mikrobiálních druhů, nalezených ve chladných prostředích moře a se schopností biodegradace jsou nejčastěji uváděny kmeny patřící k rodům *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Rhodococcus*, *Polaromonas*, *Subtercola*, *Agreia*, *Leifsonia*, *Cryobacterium* a *Flavobacterium*. Všechny 12 z těchto izolovaných kmenů bylo schopno produkovat enzym lipázu, který hydrolyzuje esterové vazby v lipidech i v některých polyesterech. Relativní lipázová aktivita byla stále detekovatelná při 0 °C u 20–40 % psychrofilních a 10–30 % psychrotrofních kmenů (Urbanek a kol., 2018).

Degradace plastů provedená sinicemi izolovanými z mořských zdrojů zatím nebyla prokázána. Enzym PETaseR280A-FLAG, produkováný mořskou rozsivkou umožňuje rozsivkám degradovat PET materiál. Toto je jediná známá prokázaná degradace plastů řasami z mořských zdrojů a poskytuje základ pro možné pozdější využití mořských řas k řešení problému plastového znečištění v moři (Shiwei a kol., 2024).

## **5 Současná řešení plastového odpadu**

V současné době se nejčastěji používají plasty typu PE, PP, PS, PVC, PET a PU, které jsou rozdělovány do dvou kategorií; polymery na základě uhlíkových vazeb a heteroatomické polymery. Celkem 77 % plastů na trhu je vyrobeno na základě uhlíkových vazeb (jako například PE, PVC, PS a PP), jsou poměrně rezistentní k hydrolýze a biodegradaci, ale na druhou stranu citlivé k termální oxidaci. Heteroatomické polymery tvoří jen 18 % plastů na trhu (jako například PET a PU), mohou být degradovány pomocí foto-oxidace, hydrolýzy i biologické degradace (Ali a kol., 2021).

K roku 2015 bylo celkem vyprodukováno přibližně 6300 megatun plastového odpadu, z nichž asi 9 % bylo recyklováno, 12 % bylo spáleno a 79 % bylo nahromaděno na skládkách nebo v přírodním prostředí (Geyer a kol., 2022).

Nejběžnější metody odstraňování plastového odpadu jsou spalování, ukládání na skládkách a recyklace. Recyklace je nejslibnější metodou, protože může pomoci snížit množství vyráběných plastů i množství plastů na skládkách (Huang a kol., 2022).

### **5.1 Skládky**

V současné době jsou skládky nejčastějším způsobem odstranění plastového odpadu. Nebiodegradabilní plasty se ale na skládkách rozkládají pomalu, což vede k rozšiřování plochy skládky kvůli neustálému zvyšujícímu se množství plastového odpadu (Huang a kol. 2022).

Plasty jsou schopné uvolňovat látky v nich obsažené do svého okolí (jako je benzen, toluen, xylen apod.) jako sekundární polutanty, což přispívá znečištění okolní půdy. Tato půda pak nemůže být využita k jiným účelům jako například zemědělství. Uvolňování BPA do půdy vede ke zvýšenému množství sirovodíku a tím se inhibuje růst rostlin v okolí skládky (Thew a kol., 2023; Huang a kol., 2022). Tyto chemikálie pak mohou kontaminovat vodní zdroje a tím narušit i ekosystémy řek, jezer a jiných vodních ploch (Azevedo-Santos a kol., 2021). Proto se zejména v Evropě zavádějí nové restrikce za účelem omezení vytváření nových skládek (Thew a kol., 2023).

### **5.2 Spalování**

Plastový odpad se mimo skladování může nechat zcela spálit za vzniku vody a oxidu uhličitého. Tento přístup umožňuje navrácení energie z výroby odpadu ve formě tepla (Thew a kol., 2023) Dopady na životní prostředí se silně odvíjejí od způsobu kontroly emisí, designu spalovacího přístroje aj. (Geyer a kol., 2022).

Spalování je považováno za lepší alternativu než skládky, jelikož se tímto způsobem generuje energie pro další využití (Thew a kol., 2023). Mezi vedlejší produkty spalování patří CO<sub>2</sub>, POPs, kyselé plyny, těžké kovy aj., které zhoršují globální oteplování a také způsobují zdravotní problémy (Huang a kol., 2022). Právě kvůli zvyšování množství nebezpečných látek v atmosféře se tato varianta nejeví jako udržitelný způsob řešení problému s plasty (Thew a kol., 2023).

### 5.3 Recyklace

Recyklace je založena na představě přetváření plastového odpadu na nové produkty, které mohou být dále využity. Recyklace může být provedena chemickým nebo mechanickým způsobem (Thew a kol., 2023), většina odpadu je recyklována mechanicky, protože je to finančně výhodná metoda (Huang a kol., 2022).

Chemické recyklování je způsob přeměny plastového odpadu v produkty, které ponechávají určitou hodnotu z hlediska dalšího využití. Jedná se o snahu o vytvoření tzv. oběhového hospodářství pro plasty. Mezi produkty, které jsou z chemické recyklace obnoveny, patří oleje s vysokou výhřevností, uhlíkové materiály, vodík, syngas (směs vodíku a oxidu uhelnatého v různých poměrech) (Thew a kol., 2023).

Mechanická recyklace je složená z několika fází. První fáze zahrnuje trhání nebo řezání plastů na malé fragmenty, se kterými se dále lépe pracuje. V další fázi se od plastů oddělí papír, hlína a jiné částice, které by mohly narušovat další procesy pomocí cyklonového separátoru. Následně oddělíme plastový odpad dle hustoty. Dalším krokem je mletí jednotlivých polymerů. Poté následuje extruze plastu, která vyústí ve vytvoření vláken, které jsou následně peletizovány za vzniku plastových pelet složených z jednoho druhu polymeru. Tyto produkty se ochladí pomocí vody a plastová granula se následně používá na výrobu nákupních tašek, žaluzií aj. (Huang, 2022).

Mechanická recyklace je rozdělena na dva typy uzavřený cyklus nebo otevřený cyklus. Uzavřený cyklus umožňuje získat recyklovaný plastový materiál o stejné kvalitě, jako byl počáteční. V dnešní době je uzavřený cyklus limitovaný na PET lahve (tzv. bottle-to-bottle systém), kde jsou lahve sbírány v odděleném odpadu a jsou recyklovány na lahve se stejnou využitelností, jako původní PET lahve. Většina mechanického recyklování probíhá jako otevřený cyklus, kde výsledná plastová granula mají nižší kvalitu než plast, který byl do procesu vložen. Otevřený cyklus spočívá v tom, že se recyklovaný plastový materiál použije na jinou funkci, než měl původní (např. z lahve se vyrobí plastové potrubí).

Existuje několik faktorů, které snižují kvalitu recyklovaného plastu, který byl vyroben touto technikou jako například degradace polymeru během extruze, kontaminace polymeru s nežádoucími polymery, nedokonalé odstranění barviv a zápachů, neznámá aditiva, která mohou být potenciálně toxická a další. Ve výsledku pak většina mechanicky recyklovaných plastů nesplňuje normy pro kontakt s potravinami a tím se i limituje jeho využitelnost. Pro zlepšení kvality výchozího produktu se často využívají aditiva nebo přidávání zcela nového polymeru ke směsi (Landrigan a kol., 2023).

Pouze 30 % plastů vyprodukovaných od roku 1950 je v současnosti stále využíváno. Většina dnes využívaných plastů jsou nově vytvořené plasty, které ještě neprošly procesem recyklace. Z celkového množství nového plastu vyrobeného na celém světě bylo 52 % vyprodukováno v Asii (32 % v Číně a 3 % v Japonsku), dále 17 % v USA, 17 % v Evropě, 7 % na Blízkém východě a Africe a 4 % v Latinské Americe. Míra recyklace plastu jsou naopak velmi nízké, pod 9 % celosvětově, mnohem nižší než míra recyklace skla (EU ~75 %), papíru (EU ~70 %) a hliníku (EU ~65 %). Kombinace rychlé výroby velkého množství typů polymerů společně s nízkými mírami recyklace vyústilo v obrovské množství plastového odpadu. Celková produkce plastového odpadu od roku 1950 je odhadována na 5,8 gigatun (Landrigan a kol. 2023). Na obrázku číslo 7 je fotografie skládky s plastovým odpadem.



Obrázek 9: Skládka s odpadu na ostrově Tilafusi, Maledivy (Mohamed, 2016, staženo 22.05.2024)

## 6 Alternativy plastů

Problémy související s plastovým znečištěním jsou jedny z největších výzev dnešní společnosti. Jakmile se plastové fragmenty dostanou do životního prostředí, je poměrně obtížné je odtud získat zpět. Výzkum ukazuje, že nejlepší strategie pro obnovu životního prostředí spočívá v uklizení pobřežních oblastí od plastového znečištění. Avšak jen v EU (jako jeden z regionů s nejvyšším podílem recyklovaných plastů na světě) může toto úsilí stát odhadem 630 milionů EUR ročně. Tato částka přitom nepřinese žádný zisk, takže schvalování a získávání finančních prostředků pro tyto iniciativy je obtížné. Během posledních desetiletí se plasty staly nejen běžně potřebným materiálem, ale zcela zásadním pro širokou škálu hospodářských odvětví, a to do té míry, že zákaz těchto materiálů z důvodu ochrany životního prostředí není proveditelný (Ferreira-Filipe a kol., 2021).

Místo nahrazování plasty jinými typy materiálů (jako např. bioplasty) by v mnoha případech byl výhodnější systém, ve kterém by bylo možné použít méně druhů recyklovatelných plastů se širokým rozmezím využití. Toto je možné provést jen v určitých typech materiálů, které lze vyrobit s jednodušším složením. Tento materiál by pak byl mnohem snazší na recyklaci (Zimmermann a kol., 2019).

V rámci udržitelnosti se čím dál tím více hledá náhrada pro plasty vyrobené z fosilních paliv, přičemž jsou bioplasty nejslibnější alternativou. Stavební materiál těchto plastů může být získán z různorodých biomas, vedlejších produktů a organických zbytků díky pokrokům v rafinaci a zpracování bio materiálů (Ferreira-Filipe a kol., 2021). Nejčastěji využívané materiály pro výrobu bioplastu jsou polymery jako škrob, želatina, alginát, agar, guarová guma a Arabská guma (Hindi a kol., 2023).

V dnešní době se vyskytuje mnoho produktů vyrobených z biodegradabilních plastů jako PLA, PCL, PBS a PBSA. Biologicky odbouratelné plasty, které lze rozdělit na plasty biologického původu nebo petrochemického původu, mohou být ekologicky degradovány mikroorganismy, což vede k fragmentaci materiálu prostřednictvím mikrobiálních enzymatických aktivit a štěpení vazeb (Urbanek a kol., 2018).

### 6.1 Bioplasty

Některé druhy vyráběných plastů se označují „biologicky rozložitelné,“ neboli bioplasty. Mezi těmito bioplasty se nachází materiály vyrobené ze škrobu spojené s plasty vyrobených z petroleje, anebo bioplasty pocházející pouze z plně obnovitelných zdrojů biomasy. Bioplasty

prvního typu nejsou plně rozložitelné a rozpadají se na plastové fragmenty a mohou být zdrojem mikroplastů v životním prostředí (Rhodes, 2018).

Bioplasty druhé kategorie lze získat z různých obnovitelných zdrojů (např. z organických zbytků, rostlinných tuků a olejů, kukuřičného škrobu, celulózy aj.) (Ferreira-Filipe a kol., 2021). Toto ale může být jedna z potencionálních nevýhod bioplastů, protože tato výroba zvyšuje konkurenci mezi využitím škrobu a jiných cukerných materiálů na výrobu bioplastů, nebo jako potraviny (Rhodes, 2018). Podle současného výzkumu jejich životního cyklu se ale zdají být obecně výhodnější z hlediska úspory fosilních zdrojů a snižování emisí skleníkových plynů. Například na výrobu PEF bylo využito o 40-50 % méně fosilních paliv a bylo vyprodukováno o 45-55 % méně skleníkových plynů, než při výrobě PET (Ferreira-Filipe a kol., 2021).

Mnoho biologicky rozložitelných plastů vyžaduje k jejich úplnému rozkladu průmyslová kompostovací zařízení, která fungují při vysokých teplotách a nemusí se tak efektivně rozkládat na zahradním kompostu nebo ve volné přírodě. Mimo jiné při mikrobiálním rozkládání bioplastů dochází k uvolňování skleníkových plynů zejména metanu. Bioplasty se také nemusí dobře rozkládat v otevřeném prostředí, např. v oceánech, kde je hladina kyslíku relativně nízká (Rhodes, 2018).

Bioplasty někdy zaostávají ve fyzikálních a chemických vlastnostech za plasty, které jsou vyrobené z fosilních paliv, což zdůrazňuje potřebu dalšího výzkumu a financování. Bioplasty musí dohnat již dobře zavedené odvětví fosilních plastů s více než půlstoletím výzkumu a vývoje. Konvenční petrochemické plasty byly v průběhu let neustále zdokonalovány, aby dosáhly ideálních vlastností pro celou řadu různých použití (Ferreira-Filipe a kol., 2021).

## **6.1 Oxo-biodegradabilní plasty**

Oxo-biodegradabilní materiály se používají zejména na tvorbu odpadkových sáčků a nákupních tašek (Markowicz a Szymańska-Pulikowska, 2021). Pojem „oxo-degradovatelný“ odkazuje na počáteční oxidační fragmentaci polymeru, díky čemuž se následně zvýší rychlost degradace (Rhodes, 2018). Toto urychlení probíhá díky přidávání pro-oxidantů do struktury polymeru. Nejčastěji jsou využívány přechodné kovy (např. Fe, Co, Mn aj.) ve formě solí (např. karboxyláty, acetylacetonu) nebo organických komplexů. Tyto přechodné kovy se chovají jako katalyzátory při fotodegradacích a termodegradacích ve sloučeninách syntetických polymerů. Tyto degradované materiály jsou pak dále zpracovávány mikroorganismy (Sciscione a kol., 2023). Oxo-biodegradabilní plasty jsou vyráběny dle evropských standardů (jako je EN 13432),

ve kterých je specifikováno, že oxo-biodegradabilní materiály by měly být z 90 % biodegradovatelné během 6 měsíců. Tyto materiály je možné společně s bioodpadem posílat na komposty (Markowicz a Szymańska-Pulikowska, 2021).

Oxo-biodegradabilní materiály by však měly být povoleny k dalšímu biologickému zpracování (jako např. kompostování) pouze tehdy, pokud se skutečně rozloží v reálných podmínkách kompostování. Vědecký výzkum rozkladu plastů se velmi často provádí v laboratorních kontrolovaných podmínkách, které se výrazně liší od skutečných podmínek (Markowicz a Szymańska-Pulikowska, 2021). Předpokládá se, že doba potřebná k degradaci plastů s oxo-aktivitou nelze přesně předpovědět, protože velmi závisí na podmínkách okolního prostředí. Bylo odhadnuto, že k degradaci oxo-degradovatelných plastů v otevřeném prostředí je zapotřebí 2–5 let (Sciscione a kol., 2023). Laboratorní podmínky umožňují pozorovat změny ve struktuře materiálu, ale celková dekompozice nebyla prokázána (Markowicz, 2021). Podle výzkumů se tedy tyto plasty nedegradují zcela, ale rozloží se na mikroplasty a tím jsou dále škodlivé životnímu prostředí obdobně jako plasty založené na petroleji (Rhodes, 2018).

## ZÁVĚR

Plasty jsou v dnešní době nezbytnou součástí našich životů. Nadbytečná výroba a nedostatečná degradace plastů ale způsobují nemalé dopady na ekonomiku, lidské zdraví a životní prostředí. Nyní se dá předpokládat, že pokud nenastane rychlá a účinná intervence, tak se budou tyto škody a dopady pouze navyšovat.

Mezi často využívané metody nakládání s plastovými odpady jsou skládky, spalování nebo recyklace. Recyklace je z těchto možností nejvýhodnější metoda z hlediska dlouhodobého zacházení s plastovým odpadem, ale v současnosti má i mnoho nevýhod jako snížení kvality recyklovaného plastu, nebo neznámé složení. Toto znamená omezení recyklovaných plastů v dalším využití.

Celosvětově je recyklace na velmi nízkých hodnotách a většina plastů, se kterými běžně přijdeme do styku jsou nově vyrobené plasty, které ještě nebyly recyklovány. Je proto nutné hledat nová řešení problematiky plastů a zavedení celosvětové politiky zacházení s plasty.

Biodegradace využitím enzymů původem od bakterií nebo jiných mikroorganismů se v současnosti zdá být nejvíce perspektivním řešením. Mikroorganismy nacházející se v prostředí kontaminovaným plasty se již dokázaly adaptovat na přítomnost syntetických polymerů a vyprodukovat mnoho typů enzymů (nejčastěji na základě hydroláz), které jsou schopné degradovat syntetické polymery. Degradované polymery následně využívají pro zdroj energie a uhlíku. V současnosti je třeba intenzivnějšího výzkumu v oboru biodegradace, protože řada těchto enzymů účinně funguje pouze po předchozí úpravě polymeru (např. UV zářením apod.). Ve výzkumech se často využívají primární plasty, které mají odlišné vlastnosti a složení od sekundárních plastů, které se vyskytují ve volné přírodě a byly vystaveny vlivům životního prostředí. Laboratorní výsledky proto mohou být zkreslené.

Další možností je využití biodegradabilních plastů, které jsou ale poměrně nové a tak zaostávají za původními petrolejovými plasty ve výzkumu a někdy i ve vlastnostech materiálu. Existuje určitá nejistota, zda jsou vůbec tyto biodegradabilní plasty zcela degradabilní.

Budoucnost naší planety závisí především na tom, zda budeme schopni vzít odpovědnost za činy naší i předchozích generací. Přírozená adaptace mikroorganismů na přítomnost syntetických polymerů může trvat moc dlouho, což by mohlo zapříčinit nevratné škody na životním prostředí.



## POUŽITÁ LITERATURA

Akbar Tahir, Alexander Turra, Amy Lusher, Chris Wilcox, Denise Hardesty, Francois Galgani, Hideshige Takada, Marcus Erikson, Martin Hasselov, Martin Thiel, Peter Kershaw, Peter Ryan, Sang Hee Hong, Sheri (Sam) Mason, Weiwei Zhang and Won Joon Shim, Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution (2019). Guidelines for the Monitoring and Assessment of Plastic Litter in the Ocean - GESAMP. Reports and Studies No. 99. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/30009>.

Ali SS, Elsamahy T, Koutra E, Kornaros M, El-Sheekh M, Abdelkarim EA, Zhu D, Sun J. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Sci Total Environ.* 2021 Jun 1;771:144719. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144719. Epub 2021 Jan 21. PMID: 33548729.

Amato-Lourenço LF, Dos Santos Galvão L, de Weger LA, Hiemstra PS, Vijver MG, Mauad T. An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *Sci Total Environ.* 2020 Dec 20;749:141676. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141676. Epub 2020 Aug 13. PMID: 32827829; PMCID: PMC7424328.

Anthony L. Andrady, The plastic in microplastics: A review, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 119, Issue 1, 2017, Pages 12-22, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X1730111X>

Baidurah S. *Methods of Analyses for Biodegradable Polymers: A Review.* *Polymers (Basel).* 2022 Nov 15;14(22):4928. doi: 10.3390/polym14224928. PMID: 36433054; PMCID: PMC9694517.

Booth, A.M., Kubowicz, S., Beegle-Krause, C., Skancke, J., Nordam, T., Landsem, E., ThroneHolst, M., Jahren, S., 2017. Microplastic in Global and Norwegian Marine Environments: Distributions, Degradation Mechanisms and Transport. *Norwegian Environment Agency (M-918).* Available at <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m918/m918.pdf>

Cf SF, Rebello S, Mathachan Aneesh E, Sindhu R, Binod P, Singh S, Pandey A. Bioprospecting of gut microflora for plastic biodegradation. *Bioengineered.* 2021 Dec;12(1):1040-1053. doi: 10.1080/21655979.2021.1902173. PMID: 33769197; PMCID: PMC8806249.

- Danso D, Chow J, Streit WR. Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. *Appl Environ Microbiol.* 2019 Sep 17;85(19):e01095-19. doi: 10.1128/AEM.01095-19. PMID: 31324632; PMCID: PMC6752018.
- El-Dash HA, Yousef NE, Aboelazm AA, Awan ZA, Yahya G, El-Ganiny AM. Optimizing Eco-Friendly Degradation of Polyvinyl Chloride (PVC) Plastic Using Environmental Strains of *Malassezia* Species and *Aspergillus fumigatus*. *Int J Mol Sci.* 2023 Oct 22;24(20):15452. doi: 10.3390/ijms242015452. PMID: 37895132; PMCID: PMC10607177.
- Ferreira-Filipe DA, Paço A, Duarte AC, Rocha-Santos T, Patrício Silva AL. Are Biobased Plastics Green Alternatives?-A Critical Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2021 Jul 21;18(15):7729. doi: 10.3390/ijerph18157729. PMID: 34360022; PMCID: PMC8345407.
- Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 2017 Jul 19;3(7):e1700782. doi: 10.1126/sciadv.1700782. PMID: 28776036; PMCID: PMC5517107.
- He Y, Rehman AU, Xu M, Not CA, Ng AMC, Djurišić AB. Photocatalytic degradation of different types of microplastics by TiO<sub>2</sub>/ZnO tetrapod photocatalysts. *Heliyon.* 2023 Nov 18;9(11):e22562. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22562. PMID: 38034782; PMCID: PMC10687295.
- Hindi SS, Albureikan MOI. Fabrication, Characterization, and Microbial Biodegradation of Transparent Nanodehydrated Bioplastic (NDB) Membranes Using Novel Casting, Dehydration, and Peeling Techniques. *Polymers (Basel).* 2023 Aug 4;15(15):3303. doi: 10.3390/polym15153303. PMID: 37571197; PMCID: PMC10422282.
- Hlišníková H, Petrovičová I, Kolena B, Šidlovská M, Sirotkin A. Effects and Mechanisms of Phthalates' Action on Reproductive Processes and Reproductive Health: A Literature Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2020 Sep 18;17(18):6811. doi: 10.3390/ijerph17186811. PMID: 32961939; PMCID: PMC7559247.
- Horton AA. Plastic pollution: When do we know enough? *J Hazard Mater.* 2022 Jan 15;422:126885. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126885. Epub 2021 Aug 11. PMID: 34418830.
- Huang S, Wang H, Ahmad W, Ahmad A, Ivanovich Vatin N, Mohamed AM, Deifalla AF, Mehmood I. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Apr 10;19(8):4556. doi: 10.3390/ijerph19084556. PMID: 35457426; PMCID: PMC9024989.

Chen CC, Han X, Ko TP, Liu W, Guo RT. Structural studies reveal the molecular mechanism of PETase. *FEBS J.* 2018 Oct;285(20):3717-3723. doi: 10.1111/febs.14612. Epub 2018 Aug 17. PMID: 30048043.

Chen D, Kannan K, Tan H, Zheng Z, Feng YL, Wu Y, Widelka M. Bisphenol Analogues Other Than BPA: Environmental Occurrence, Human Exposure, and Toxicity-A Review. *Environ Sci Technol.* 2016 Jun 7;50(11):5438-53. doi: 10.1021/acs.est.5b05387. Epub 2016 May 17. PMID: 27143250.

Klemeš JJ, Fan YV, Tan RR, Jiang P. Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renew Sustain Energy Rev.* 2020 Jul;127:109883. doi: 10.1016/j.rser.2020.109883. Epub 2020 Apr 27. PMID: 34234614; PMCID: PMC7183989.

Landrigan PJ, Raps H, Cropper M, Bald C, Brunner M, Canonizado EM, Charles D, Chiles TC, Donohue MJ, Enck J, Fenichel P, Fleming LE, Ferrier-Pages C, Fordham R, Gozt A, Griffin C, Hahn ME, Haryanto B, Hixson R, Ianelli H, James BD, Kumar P, Laborde A, Law KL, Martin K, Mu J, Mulders Y, Mustapha A, Niu J, Pahl S, Park Y, Pedrotti ML, Pitt JA, Ruchirawat M, Seewoo BJ, Spring M, Stegeman JJ, Suk W, Symeonides C, Takada H, Thompson RC, Vicini A, Wang Z, Whitman E, Wirth D, Wolff M, Yousuf AK, Dunlop S. The Minderoo-Monaco Commission on Plastics and Human Health. *Ann Glob Health.* 2023 Mar 21;89(1):23. doi: 10.5334/aogh.4056. Erratum in: *Ann Glob Health.* 2023 Oct 11;89(1):71. PMID: 36969097; PMCID: PMC10038118.

Lau WWY, Shiran Y, Bailey RM, Cook E, Stuchtey MR, Koskella J, Velis CA, Godfrey L, Boucher J, Murphy MB, Thompson RC, Jankowska E, Castillo Castillo A, Pilditch TD, Dixon B, Koerselman L, Kosior E, Favoino E, Gutberlet J, Baulch S, Atreya ME, Fischer D, He KK, Petit MM, Sumaila UR, Neil E, Bernhofen MV, Lawrence K, Palardy JE. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science.* 2020 Sep 18;369(6510):1455-1461. doi: 10.1126/science.aba9475. Epub 2020 Jul 23. PMID: 32703909.

Lee HM, Kim HR, Jeon E, Yu HC, Lee S, Li J, Kim DH. Evaluation of the Biodegradation Efficiency of Four Various Types of Plastics by *Pseudomonas aeruginosa* Isolated from the Gut Extract of Superworms. *Microorganisms.* 2020 Sep 2;8(9):1341. doi: 10.3390/microorganisms8091341. PMID: 32887431; PMCID: PMC7563362.

- Lv Shiwei, Li Y, Zhao S, Shao Z. Biodegradation of Typical Plastics: From Microbial Diversity to Metabolic Mechanisms. *Int J Mol Sci*. 2024 Jan 2;25(1):593. doi: 10.3390/ijms25010593. PMID: 38203764; PMCID: PMC10778777.
- Mariana M, Castelo-Branco M, Soares AM, Cairrao E. Phthalates' exposure leads to an increasing concern on cardiovascular health. *J Hazard Mater*. 2023 Sep 5;457:131680. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131680. Epub 2023 May 23. PMID: 37269565.
- Markowicz F, Szymańska-Pulikowska A. Assessment of the Decomposition of Oxo- and Biodegradable Packaging Using FTIR Spectroscopy. *Materials (Basel)*. 2021 Oct 27;14(21):6449. doi: 10.3390/ma14216449. PMID: 34771974; PMCID: PMC8585154.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. Reckoning with the U.S. Role in Global Ocean Plastic Waste. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26132>.
- Ni M, Li X, Zhang L, Kumar V, Chen J. Bibliometric Analysis of the Toxicity of Bisphenol A. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Jun 27;19(13):7886. doi: 10.3390/ijerph19137886. PMID: 35805543; PMCID: PMC9266187.
- Ogunbayo, A. , Olanipekun, O. and Adamu, I. (2019) Preliminary Studies on the Microbial Degradation of Plastic Waste Using *Aspergillus niger* and *Pseudomonas* sp.. *Journal of Environmental Protection*, 10, 625-631. doi: 10.4236/jep.2019.105037.
- Palm GJ, Reisky L, Böttcher D, Müller H, Michels EAP, Walczak MC, Berndt L, Weiss MS, Bornscheuer UT, Weber G. Structure of the plastic-degrading *Ideonella sakaiensis* MHETase bound to a substrate. *Nat Commun*. 2019 Apr 12;10(1):1717. doi: 10.1038/s41467-019-09326-3. PMID: 30979881; PMCID: PMC6461665.
- Pathak, V.M., Navneet Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresour. Bioprocess*. 4, 15 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0145-9>
- Rhodes CJ. Plastic pollution and potential solutions. *Sci Prog*. 2018 Sep 1;101(3):207-260. doi: 10.3184/003685018X15294876706211. Epub 2018 Jul 19. PMID: 30025551; PMCID: PMC10365157.
- Roberts C, Edwards S, Vague M, León-Zayas R, Scheffer H, Chan G, Swartz NA, Mellies JL. Environmental Consortium Containing *Pseudomonas* and *Bacillus* Species Synergistically

Degrades Polyethylene Terephthalate Plastic. *mSphere*. 2020 Dec 23;5(6):e01151-20. doi: 10.1128/mSphere.01151-20. PMID: 33361127; PMCID: PMC7763552.

Sciscione F, Hailes HC, Miodownik M. The performance and environmental impact of pro-oxidant additive containing plastics in the open unmanaged environment-a review of the evidence.

*R Soc Open Sci*. 2023 May 10;10(5):230089. doi: 10.1098/rsos.230089. PMID: 37181792; PMCID: PMC10170345.

Shaista Manzoor, Nafiaah Naqash, Gowhar Rashid, Rahul Singh, Plastic Material Degradation and Formation of Microplastic in the Environment: A Review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 56, Part 6, 2022, Pages 3254-3260, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.379>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321062611>)

Silva RRA, Marques CS, Arruda TR, Teixeira SC, de Oliveira TV. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. *Macromol*. 2023; 3(2):371-399. <https://doi.org/10.3390/macromol3020023>

Sowmya, H.V. & Bellibatlu, Ramalingappa & Basaiah, Thippeswamy & Krishnappa, M.. (2014). ISSN Original Article Biodegradation of Polyethylene by *Bacillus cereus* - PDF Free Download.

Srikanth M, Sandeep TSRS, Sucharitha K, Godi S. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresour Bioprocess*. 2022 Apr 8;9(1):42. doi: 10.1186/s40643-022-00532-4. PMID: 38647755; PMCID: PMC10991219.

Thew CXE, Lee ZS, Srinophakun P, Ooi CW. Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach. *Bioresour Technol*. 2023 Apr;374:128772. doi: 10.1016/j.biortech.2023.128772. Epub 2023 Feb 23. PMID: 36828218.

Urbanek AK, Rymowicz W, Mirończuk AM. Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2018 Sep;102(18):7669-7678. doi: 10.1007/s00253-018-9195-y. Epub 2018 Jul 11. PMID: 29992436; PMCID: PMC6132502.

Urbanek AK, Rymowicz W, Strzelecki MC, Kociuba W, Franczak Ł, Mirończuk AM. Isolation and characterization of Arctic microorganisms decomposing bioplastics. *AMB Express*. 2017

Dec;7(1):148. doi: 10.1186/s13568-017-0448-4. Epub 2017 Jul 11. PMID: 28697585; PMCID: PMC5503855.

Valter M. Azevedo-Santos, Marcelo F. G.f, Brito MFG, Manoel PS, Perroca JF, Rodrigues-Filho JL, Paschoal LRP, Gonçalves GRL, Wolf MR, Blettler MCM, Andrade MC, Nobile AB, Lima FP, Ruocco AMC, Silva CV, Perbiche-Neves G, Portinho JL, Giarrizzo T, Arcifa MS, Pelicice FM. Plastic pollution: A focus on freshwater biodiversity. *Ambio*. 2021 Jul;50(7):1313-1324.

doi: 10.1007/s13280-020-01496-5. Epub 2021 Feb 4. PMID: 33543362; PMCID: PMC8116388.

Vandenberg LN, Hauser R, Marcus M, Olea N, Welshons WV. Human exposure to bisphenol A (BPA). *Reprod Toxicol*. 2007 Aug-Sep;24(2):139-77. doi: 10.1016/j.reprotox.2007.07.010. Epub 2007 Jul 31. PMID: 17825522.

Walter A, Sopracolle L, Mutschlechner M, Spruck M, Griesbeck C. Biodegradation of different PET variants from food containers by *Ideonella sakaiensis*. *Arch Microbiol*. 2022 Nov 16;204(12):711. doi: 10.1007/s00203-022-03306-w. PMID: 36385587; PMCID: PMC9668955.

Wilkes RA, Aristilde L. Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *J Appl Microbiol*. 2017 Sep;123(3):582-593. doi: 10.1111/jam.13472. Epub 2017 May 31. PMID: 28419654.

Wright SL, Kelly FJ. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environ Sci Technol*. 2017 Jun 20;51(12):6634-6647. doi: 10.1021/acs.est.7b00423. Epub 2017 Jun 7. PMID: 28531345.

Yang T, Ren L, Jia Y, Fan S, Wang J, Wang J, Nahurira R, Wang H, Yan Y. Biodegradation of Di-(2-ethylhexyl) Phthalate by *Rhodococcus ruber* YC-YT1 in Contaminated Water and Soil. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 May 11;15(5):964. doi: 10.3390/ijerph15050964. PMID: 29751654; PMCID: PMC5982003.

Zaaba NF, Jaafar M. A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polym Eng Sci*. 2020; 60: 2061–2075. doi: 10.1002/pen.25511

Zadjelovic V, Erni-Cassola G, Obrador-Viel T, Lester D, Eley Y, Gibson MI, Dorador C, Golyshin PN, Black S, Wellington EMH, Christie-Oleza JA. A mechanistic understanding of

polyethylene biodegradation by the marine bacterium *Alcanivorax*. *J Hazard Mater.* 2022 Aug 15;436:129278. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129278. Epub 2022 Jun 3. PMID: 35739790.

Zampolli J, Vezzini D, Brocca S, Di Gennaro P. Insights into the biodegradation of polycaprolactone through genomic analysis of two plastic-degrading *Rhodococcus* bacteria. *Front Microbiol.* 2024 Jan 3;14:1284956. doi: 10.3389/fmicb.2023.1284956. PMID: 38235436; PMCID: PMC10791956.

Zimmermann L, Dierkes G, Ternes TA, Völker C, Wagner M. Benchmarking the in Vitro Toxicity and Chemical Composition of Plastic Consumer Products. *Environ Sci Technol.* 2019 Oct 1;53(19):11467-11477. doi: 10.1021/acs.est.9b02293. Epub 2019 Sep 16. PMID: 31380625.

## ZDROJE OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Stahl-Timmins W. 2022. Staženo a upraveno 16.05.2024. Plastic life cycle, Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10038118/figure/F2.1/>

Obrázek 2: Thompson R. C. Trash next to a waterway in Indonesia. 2023. Staženo 18.04.2024. Univerzity of Plymouth. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10038118/figure/F6.8/>

Obrázek 3: Böll-Stiftung H. 2019. Staženo a upraveno 16.05.2024. Plastic Atlas - Bottled water is marketed as a healthy alternative to tapwater. Bottlers have to list the mineral contents in detail. Microplastic does not appear as an ingredient,. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/boellstiftung/48948045936/>

Obrázek 4: Takada S., Brunner M. 2023. Staženo a upraveno 16.05.2024. Conceptual model of microplastic-mediated transfer of additives and POPs to marine animals and humans. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10038118/figure/F3.4/>

Obrázek 5: Wang G.-X.; Huang, D.; Ji, J.-H.; Völker, C.; Wurm, F.R. Seawater-Degradable Polymers—Fighting the Marine Plastic Pollution. *Adv. Sci.* 2020, 8, 2001121. Staženo a upraveno 22.5.2024. Schematic representation of the different steps involved in biodegradation. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.202001121>

Obrázek 6: Ali SS, Elsamahy T, Koutra E, Kornaros M, El-Sheekh M, Abdelkarim EA, Zhu D, Sun J. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Sci Total Environ.* 2021 Jun 1;771:144719. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144719. Epub 2021 Jan 21. PMID: 33548729. Staženo a upraveno 22.05.2024. Factors affecting the plastic abiotic degradation rate. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720382528?via%3Dihub>

Obrázek 7: Haider TP, Völker C, Kramm J, Landfester K, Wurm FR. Plastics of the Future? The Impact of Biodegradable Polymers on the Environment and on Society. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2019 Jan 2;58(1):50-62. doi: 10.1002/anie.201805766. Epub 2018 Nov 11. PMID: 29972726. Staženo a upraveno 16.05.2024. Schematic representation of the different steps involved in biodegradation. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201805766>



Obrázek 8: Ali SS, Elsamahy T, Koutra E, Kornaros M, El-Sheekh M, Abdelkarim EA, Zhu D, Sun J. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Sci Total Environ.* 2021 Jun 1;771:144719. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144719. Epub 2021 Jan 21. PMID: 33548729. Microbial degradation stages of plastic polymers. Staženo a upraveno 18.04.2024. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720382528?via%3Dihub>

Obrázek 9: Mohamed A. R. 2016. Staženo 22.05.2024. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-photo/waste-plastic-bottles-other-types-thilafushi-426187984>