

MIKROPLASTY AKO ENVIRONMENTÁLNE RIZIKO

ANNA GREŇČÍKOVÁ^a, PAULA BRANDEBUROVÁ^a,
JOZEF RYBA^b, STANIŠLAVA VLČKOVÁ^a
a TOMÁŠ MACKULAK^a

^a Oddelenie environmentálneho inžinierstva, Ústav chemického a environmentálneho inžinierstva, ^b Oddelenie spracovania polymérov (detašované pracovisko), Ústav prírodných a syntetických polymérov, Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava
a.nic.grencik@gmail.com

Došlo 26.2.18, prijaté 10.5.18.

Kľúčové slová: mikroplasty, zdroje a správanie sa, hlavné zdroje, ekotoxicita, potravinový reťazec

Obsah

1. Úvod
2. Zdroje mikroplastov v životnom prostredí
3. Správanie sa mikroplastov v životnom prostredí
4. Mikroplasty v potravinovom reťazci a riziká spojené s ich výskytom
5. Súčasný poznatky v oblasti degradácie polymérov v životnom prostredí
6. Záver

1. Úvod

Éru plastov v roku 1907 odštartoval vývoj prvého moderného plastu, Bakelitu, stojaci za optimalizáciou nenákladných výrobných techník plejády ľahkých, trvácnych, inertných a korózii odolných materiálov¹. Uvádzané atribúty viedli k extenzívnej aplikácii plastov v nespočetnom rade odvetví priemyslu, medicíny i iných sférach ľudskej činnosti, kde zaujali zdanlivo nenahraditeľnú pozíciu^{2,3}. V súčasnosti sa viacero štúdií snaží odhadnúť množstvo vyrobených syntetických a polysyntetických polymérov za posledných osemdesiat rokov, charakteristických ich masovou výrobou. Príkladom je štúdia, v ktorej Geyer a kolektív odhadujú množstvo vyrobených plastov do roku 2015 na 8,3 miliardy ton, z čoho bola zrecyklovaná menej ako desatina⁴. Za posledných 15 rokov sa výroba plastov celosvetovo minimálne zdvojnásobila. Existuje reálny odhad, že ak bude súčasný trend pokračovať, množstvo skládkovaného plastového odpadu môže do

roku 2050 presiahnuť hodnotu 12 miliárd ton (cit.^{5,6}). Rovnaká vedecká skupina uverejnila štúdiu popisujúcu prienik plastového odpadu z pobreží pevnín do oceánov. Podľa štúdie končí v oceánoch každoročne približne 8 miliónov ton plastového odpadu, a to predovšetkým vo forme obalových produktov rôznych veľkostí. Plávajúci plast pritom tvorí len približne 10 % z celkového množstva, zvyšných 90 % je možné nájsť v morskom sedimente alebo rozptýlené v objeme morskej vody⁷. V súčasnosti je možné pozorovať značný vedecký záujem o monitoring či správanie sa nie len makroplastových objektov, ale aj ich mikro- či nanoekvivalentov^{8,9}. Mikroplasty, typicky definované ako syntetické polyméry s veľkosťou <5 mm, sú v podobe malých granúl cielene aplikované do mnohých kozmetických prípravkov alebo vznikajú pri opotrebovaní či degradácii makro výrobkov¹⁰. Prítomnosť malých plastových fragmentov v otvorenom oceáne bola popisovaná už v 70. rokoch minulého storočia Carpenterom a Smithom¹¹. Úsilie vedcov za poslednú dekádu však odhalilo, že sa jedná o široko rozšírenú skupinu kontaminantov vykazujúcu potenciálne toxický účinok na prítomnú biotu, vrátane ľudskej populácie¹².

Predkladaný článok má za cieľ sumarizovať súčasný poznanie v oblasti environmentálnej problematiky mikroplastov a ucelene čitateľa oboznámiť s možnou prognózou dopadu týchto mikropolutantov na jednotlivé zložky životného prostredia.

2. Zdroje mikroplastov v životnom prostredí

Vplyv mikroplastov na životné prostredie je v súčasnosti relatívne novou rýchlo sa rozvíjajúcou oblasťou environmentálnej problematiky, o čom svedčí množstvo odborných prác^{12,13}. Prítomnosť mikroplastov či nanoplastov v rôznych zložkách životného prostredia v globálnom rozsahu vzbudzuje signifikantné obavy, spájané s identifikáciou nových a potenciálnych zdrojov mikro- až nanopolutantov¹⁴.

Ako primárny zdroj mikro a nanoplastov pre rôzne zložky životného prostredia je možné považovať najmä automobilový, kozmetický priemysel a nové aplikácie v oblasti modernej medicíny^{15,16}. Pre kozmetické účely sú obvykle používané polyetylénové či polypropylénové granuláty (<5 mm) a polystyrénové sférické častice (<2 mm) (cit.¹⁷). Je možné pozorovať aj nárast štúdií popisujúcich diagnostiku menších častíc rôznych i nepravidelných tvarov s typickými rozmermi v rozsahu 0,1 mm až 0,5 mm približujúcich sa tým, využívaným na poli farmakologického výskumu^{15,18}. Medzi primárne mikroplasty sú radené i tie, využívané pri úprave povrchov tlakovými abrazívnymi čistiacimi technológiami¹⁹. Príkladom je technológia

pieskovania, pri ktorej môžu byť využívané mikročastice. Ako pieskovací prostriedok sú využívané najmä mikroplasty na báze polyakrylu, melamínu alebo polyesteru, ktoré sa v priebehu ich aplikácie dostávajú do styku i s toxickými kovmi a môžu byť nimi kontaminované¹⁷. Rovnaké je zaradenie i priemyselných odpadov v podobe plastových peliet o rozmeroch 2 až 5 mm či odpadov vznikajúcich pri technológii 3D tlače^{20,21}.

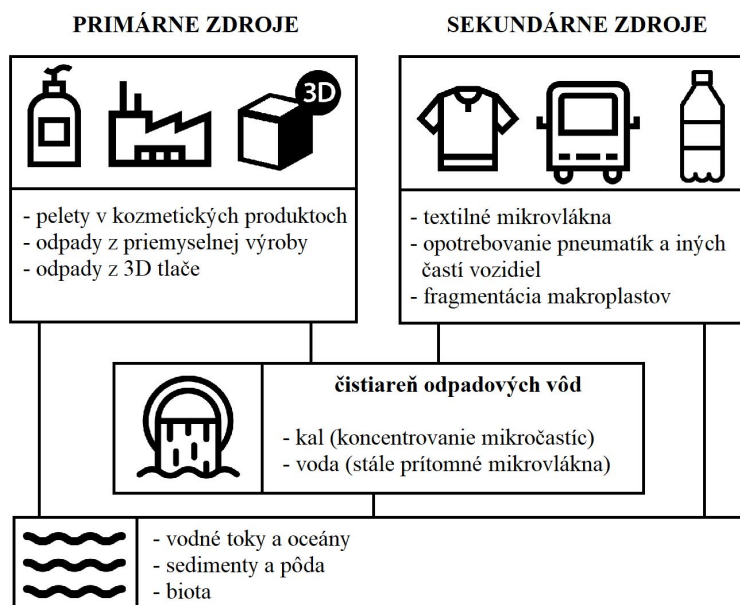
Skupina sekundárnych mikro a nanoplastov zahŕňa všetky plastové fragmenty odvodené z ich makrokonštrukcií, ktorých štruktúrna integrita je časom narušaná účinkom rôznych degradačných postupov^{22,23}. Degradácia polymérnej matrice vedie k narušeniu pôvodných interakcií, čím môže dochádzať k postupnému uvoľňovaniu aditív, dizajnovaných za účelom zlepšenia kvality či životnosti výrobku²⁴. Fotooxidácii podliehajú najmä plasty lokalizované na pobrežiach pláží, kde je dostatočné množstvo kyselika i možnosť priamej expozície slnečnému žiareniu^{25,26}. Tieto skutočnosti vedú k vzniku prasklín a fragmentácii materiálu. K ďalšiemu rozkladu prispievajú aj prirodzené sa vyskytujúce faktory spojené s prílivom a odlivom, tvorbou morských vln a turbulenciou zapríčinenou morskými prúdmi^{27,18}. Uvedené faktory prispievajú k štiepeniu polymérneho reťazca, pričom výsledkom tejto činnosti sú mikroelementy detekované vo veľkosti už 1,6 µm, pričom je predpoklad, že dochádza k ďalšiemu fragmentovaniu²⁹. K sekundárnym mikroplastom sú zaraďované i tie, vznikajúce opotrebovaním textilných materiálov, a to už priamo v pracovniach či pracích zariadeniach bežných domácností a sušiarňach.

O čiastočné nahradenie klasických plastov sa vedci pokúšajú vývojom a aplikáciou biodegradovateľných variantov³⁰. Tie pozostávajú zväčša zo syntetického polyméru a škrobu, rastlinných olejov alebo špeciálnych chemikálií spúšťajúcich a akcelerujúcich rozklad konečného výrobku²¹. V procese dekompozície takýchto materiálov je však rozkladaná iba škrobová časť, zatiaľ čo syntetický polymér zotrúva zväčša neporušený a môže tak predstavovať potencióálny sekundárny polutant pre životné prostredie^{30,31} (obr. 1).

3. Správanie sa mikroplastov v životnom prostredí

Štúdium prestupu mikroplastov životným prostredím je úzko späté s kolobehom ich makroskopických ekvivalentov³². Andrary a kolektív publikovali prácu v ktorej tvrdia, že plasty detekované v moriach sú tvorené až z 80 % časticami terestriálneho pôvodu, a teda takými ktorých primárna aplikácia nesúvisí s vodným hospodárstvom či akvakultúrou, ale skôr s ľudskou činnosťou na pevnine²⁵. Ich zdrojom sú kozmetické prípravky, pieskovacie činidlá či výluhy z plastového odpadu, ktoré vstupujú do vodného cyklu prostredníctvom drenážnych systémov či kanalizáciou^{33,34}.

Niekoľko štúdií odkazuje na čistiarene odpadových vôd ako na možné kontinuálne bodové zdroje znečistenia povrchových vôd mikroplastami. Čistiarene odpadových vôd (ČOV) sú v súčasnosti schopné technologicky zachy-



Obr. 1. Rozdelenie hlavných zdrojov mikroplastov pre odpadové, povrchové vody a pôdu

távať najmä makročastice plastov >10–1 mm (primárne a sekundárne čistenie), zatiaľ čo ich menšie fragmenty <1 mm môžu prechádzať cez proces čistenia odpadových vôd až do recipienta a vstupujú tak do vodného prostredia^{35,36}. Je nutné zdôrazniť, že časť mikroplastov môže byť na ČOV úspešne odstraňovaná z odpadovej vody napríklad procesom sorpcie na primárny alebo aktivovaný kal³⁷. Plasty vstupujúce do riečnych systémov priamo, nezodpovednosťou obyvateľstva alebo nepriazňou počasia, ale i nepriamo prostredníctvom odtokov z čistiarní odpadových vôd alebo priesakmi sú ďalej transportované do svetových morí a oceánov, ako to popisujú odborné štúdie³⁶. Moore a spol.³⁸ sledovali prítomnosť plastových fragmentov o veľkosti <5 mm v dvoch riekach v Los Angeles. Extrapolácia získaných dát viedla k tvrdeniu, že len tieto dve rieky sú schopné transportovať do mora 2 bilióny plastových častíc v priebehu 3 dní, pričom situácia môže byť značne ovplyvnená účinkom povodní alebo hurikánov charakteristických pre územie Kalifornie. K množstvu plastov v moriach a oceánoch môže prispievať i rozvinutý pobrežný turizmus³⁹. V dynamickom prostredí pláží môžu byť plastové elementy lokalizované v hĺbkovom profile i niekoľko metrov pod povrchom, kde môže dochádzať k ich postupnému vyplavovaniu. Plastové mikročastice sú v pobrežných sedimentoch hojne zastúpené, pričom ich menšie ekvivalenty sú tvorené prevažne mikrovlákнами textílií⁴⁰. Napríklad Dekiff a spol.⁴¹ uvádzajú ~5–25 mikroplastových častíc, prevažne vlákien, v kilograme sedimentu z pobrežia ostrova Norderney (Severné more). Rovnako nedávna štúdia zameraná na sediment baltického pobrežia Ruska potvrdila prítomnosť mikroplastov vo všetkých vzorkách v priemernej koncentrácii 34 ± 10 častíc na kilogram sedimentu⁴². Iné skupiny vedcov popisujú výskyt a distribúciu mikroplastov v sedimentoch mangrovníkov, obojživelných stromov, rastúcich v Singapure či v Malajzii^{43,44}. Faktom je, že v súčasnosti sa mikroplasty nachádzajú v morských sedimentoch vo veľmi vysokých koncentráciách, a to až 3,3 % hmotnosti sedimentov na veľmi znečistených pobrežiach⁴⁵. Hlbokomorské oblasti, podmorské kaňony a desiatky tisíc kilometrov pobreží môžu byť v súčasnosti považované za akési potenciálne úložiská mikroplastov⁴⁶.

Zatiaľ čo väčšina štúdií sa sústreďuje na mikroplasty vo vodnom prostredí, časť vedcov upozorňuje na úlohu atmosféry ako transportného média mikroplastov^{47,48}. Dris a spol.⁴⁷ vo svojej štúdií extrapoláciou zozbieraných dát hrubo odhadujú množstvo každoročne akumulovaných vlákien nad parížskou aglomeráciou (2500 km²) na 3 až 10 ton, pričom minimálne 30 % z nich má syntetický pôvod. Koncentrácia vlákien vzrastá v urbanizovaných oblastiach, čo podporuje hypotézu, že významným zdrojom sú prevažne produkty textilného priemyslu. Podobná štúdia bola vykonaná i v čínskom meste Dongguan, ktorá stanovila depozíciu mikroplastov atmosférickým spádom na hodnotu v rozmedzí $31 \pm 8 - 43 \pm 4$ častíc/m²/deň (cit.⁴⁸).

V životnom prostredí je možné pozorovať isté interakcie a dynamiku medzi jeho zložkami. Z tohto dôvodu je možné sa domnievať, že dochádza k prestupu mikroplasto-

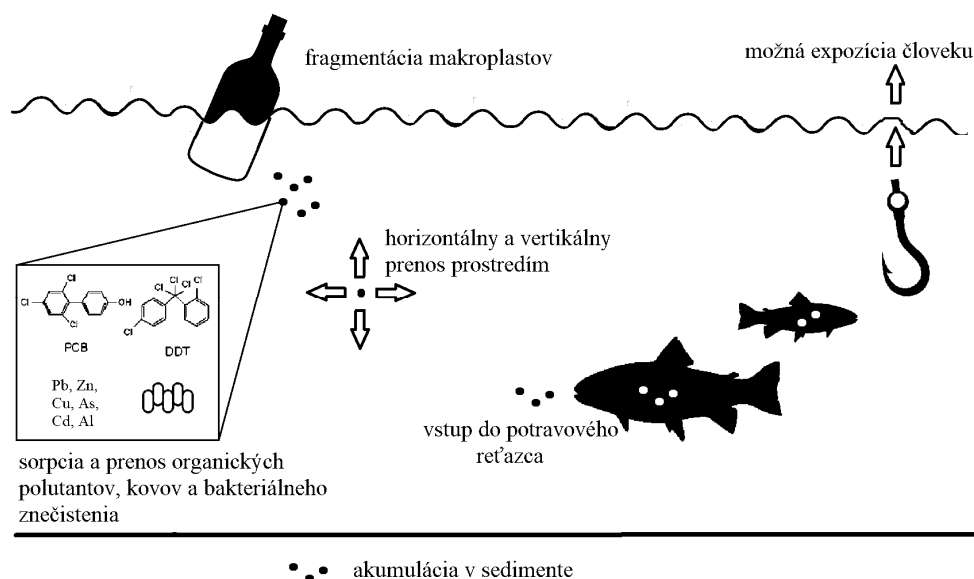
vých častíc z ovzdušia do povrchových vôd a pôd prostredníctvom aj zrážok⁴⁹. Potencionálnym transportným médium mikroplastov môžu byť i plávajúce arktické ľadovce schopné inkorporovať tento druh znečistenia vznášajúci sa na hladinách oceánov a ďalej ho prenášať k centrálnemu arktickému ľadovcu⁵⁰.

4. Mikroplasty v potravinovom reťazci a riziká spojené s ich výskytom

Mikroplasty deponované na poľnohospodárske a iné pôdy, samospádom z atmosféry alebo aplikáciou čistiarenských kalov, majú schopnosť akumulovať sa v tejto pôde a následne prestupovať koreňovou sústavou do nižších i vyšších rastlín, pričom zasahujú i symbiotické spoločenstvá mikroorganizmov^{51,52}. Mnohé z prítomných živočíchov, a to najmä pôdne červy, sú schopné mikroplasty inkorporovať do svojich tiel a prostredníctvom svojich výlučkov prispievať k ich vertikálnemu i horizontálnemu rozptylu^{53,54} (obr. 2).

Iné odborné štúdie poukazujú aj na schopnosť mikroplastov kumulovať sa v telách vodných živočíchov a touto cestou prenikať do potravinového reťazca. Ich prítomnosť bola zistená vo viacerých zástupcoch zooplanktónu, a tiež skupine bentických organizmov, živiacich sa výhradne odumretými časťami koralov a živočíchov^{55,56}. *Thyonella gemmata* a *Holothuria floridana* sú príkladom morských červov, v ktorých boli úspešne identifikované nadmerné množstvá PVC mikroplastov. Mikroplasty v ich tele zotrvali aj viac ako 10 dní (cit.⁵⁷). Požitie mikroplastov samotných alebo inkorporovaných v telách koristi je problémom širokého spektra organizmov od bezstavovcov, ako sú už spomínané pieskové červy či lastúrniky, po ryby, korytnačky, vtáky i cicavce obývajúce tak sladké ako i slané vody^{58,59}. U menších živočíchov môže vyvolať až pocit nasýtenia, avšak konzument nedostáva potrebné živiny, čo môže viesť k fyzickým ťažkostiam⁶⁰. Medzi ďalšie pozorované nepriaznivé účinky je možné zaradiť interferenciu mikroplastov s imunitným systémom postihnutého organizmu a zmeny správania, vedúce k zníženej schopnosti lovu⁶¹. Tvrdenie, že niektoré typy organizmov uprednostňujú mikroplasty pred prirodzenou potravou je doposiaľ sporné^{62,63}.

Všeobecne prevláda názor, že samotné plasty nevykazujú výraznú toxicitu, no napriek tomu pre živý organizmus môžu byť chemickou hrozbou. Rizikový faktor predstavujú predovšetkým rôzne aditívne látky, ktoré sú do plastov pridávané za účelom zlepšenia mechanických vlastností či predĺženia životnosti⁶⁴. Retardéry horenia alebo i často skloňované zmäkčovadlá na báze esterov kyseliny ftalovej môžu byť z polymérnej matrice uvoľňované počas chemického, fotochemického alebo biologického rozpadu^{65,66}. Jednou z potenciónalne uvoľňovaných látok je i oxid antimónitý, katalyzátor pridávaný do plastových obalov na báze polyetylentereftalátu (PET), ktoré tvoria podstatnú časť plastového odpadu v moriach²⁸. V prípade mikroplastov je možné sledovať i opačný fenomén, a to vychytávanie toxických látok prítomných vo



Obr. 2. **Možný prienik mikroplastov do potravného reťazca:** Plasty prítomné vo vodnom prostredí podliehajú rôznym degradačným procesom, napríklad fotodegradácii, biochemickej či chemickej degradácii, v dôsledku čoho vznikajú mikročastice schopné prenikať do tiel živých organizmov, a touto cestou vstupovať do potravného reťazca. Mikroplasty môžu zároveň za určitých podmienok sorbovať v prostredí prítomné znečistenie, vrátane toxických kovov alebo perzistentných organických látok, a následne ich rozširovať mimo primárne postihnuté územie, vrátane vnútorného prostredia organizmu. Taktiež nie je vylúčená ani možnosť prenosu mikroorganického znečistenia prípadne plazmidov zodpovedajúcich za možné šírenie rezistencie baktérií voči antibiotikám⁸⁰

vodnom prostredí i atmosfére. Vďaka vysokej hodnote špecifického povrchu sú zjavne inertné mikročastice schopné na svojom povrchu zakonzentrovávať toxické kovy či organické zlúčeniny⁶⁷. Kontaminované mikroplasty môžu navyše migrovať životným prostredím a rozširovať toto znečistenie i mimo primárne postihnuté miesto⁶⁸. Štúdie zamerané na prítomnosť ťažkých kovov potvrdili známky hliníka, medi, striebra, zinku, olova, železa a mangánu vo vzorkách mikropeliet získaných z morských vôd⁶⁹. Hydrofóbný charakter podporuje schopnosť mikroplastov kumulovať na svojom povrchu nebezpečné perzistentné organické polutanty (POPs), vrátane zástupcov pesticídov (DDT), polycyklických aromatických uhľovodíkov (PAH) a polychlórovaných bifenylov (PCB)²¹. Látky radu POPs adsorbované na povrchu mikroplastov môžu byť asimilované rôznonôžkami *Allorchestes compressa* i tkanivami rýb⁷⁰. Chemické látky obsiahnuté v mikroplastoch môžu spôsobovať zápal, oxidačný stres, pokles celkovej hmotnosti a rastu organizmov, zapríčiniť rakovinu, vrodené chyby i problémy s imunitným systémom⁷¹. Riziká spojené s výskytom mikroplastov vo vodnom prostredí reflektuje séria laboratórnych testov vykonaných na morských krevetách druhu *Artemia sp. Nauplii*, ktoré boli vystavené pôsobeniu vysokej koncentrácii mikroplastov ($1,2 \cdot 10^6$ častíc/20 000 *Nauplii*). Pozorovania vedú k záverom, že tieto organizmy sú schopné požiť dané znečistenie, pričom časť materiálu vo veľkostnom rozmedzí 1–20 μm je následne kumulovaná v ich telách vo vysokých koncentráciách. V priebehu ďalších

pokusov boli tieto krevety začlenené do modelového potravného reťazca, ako potrava pre *Danio Rerio*. Tie boli schopné časť nahromadených častíc mikroplastov vylúčiť z organizmu, niektoré častice však prenikli do organizmu a zadržali sa v bunkách epitelu a črevných klkoch. Experiment viedol i k zisteniu, že častice mikroplastov slúžia ako nosič pridruženého perzistentného organického polutantu – benzo[a]pyrénu (BaP) z *Nauplii* do zebričiek, v ktorých tráviacom trakte sa táto látka zachovala⁷².

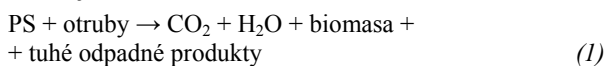
5. Súčasné poznatky v oblasti degradácie polymérov v životnom prostredí

K degradácii plastového odpadu v životnom prostredí prispieva viacero faktorov. Kvantitatívna miera rozkladného efektu jednotlivých degradačných postupov ako aj ich časový priebeh sú podmienené fyzikálnochemickými vlastnosťami samotného materiálu⁷³. Niektoré plastové materiály sú vo svojej podstate odolnejšie a vo vodnom prostredí veľmi perzistentné. V dôsledku toho degradácia týchto materiálov môže trvať i niekoľko tisíc rokov. Na druhú stranu mäkké a krehké plasty podliehajú degradácii ochotnejšie⁷³. Degradáciu plastov je vo všeobecnosti možné definovať ako akýkoľvek proces vedúci k narušeniu makromolekulového reťazca, pričom je možné rozlíšiť dva hlavné spôsoby degradácie, a to biotickú a abiotickú.

Biotická degradácia plastov sa zakladá na schopnosti vybraných organizmov, predovšetkým mikroorganizmov,

využívať uhlík prítomný v štruktúre týchto makromolekúl ako zdroj energie. Biotickej degradácii zväčša predchádza fragmentovanie polyméru, a teda skrátenie polymérneho reťazca na takú veľkosť, aby bol schopný transportu cez bunkovú stenu bunky do vnútorného prostredia mikroorganizmu. K rozkladu uhlíkových väzieb dlhého polymérneho reťazca prispievajú faktory, ako je množstvo kyslíka v prostredí, vlhkosť, teplo, UV žiarenie ako i prítomnosť a aktivita extracelulárnych mikrobiálnych enzýmov. Skrátený reťazec je následne vo vnútornom prostredí mikroorganizmu využívaný ako zdroj energie a anaeróbne alebo aeróbne premieňaný na biomasu, vodu, oxid uhlíčitý alebo metán v závislosti od podmienok rozkladu⁷³. Medzi najpopulárnejšie biodegradovateľné plasty patrí polyhydroxybutyrát (PHB), polylaktón (PCL) a kyselina polymliečna (PLA).

V súčasnosti viaceré vedecké skupiny odkazujú na schopnosť hmyzu, a to špeciálne, lariev múčnych červov a niektorých druhov mólí, konzumovať plastový odpad z PVC či PE (cit.^{73–75}). Na rozdiel od iných organizmov plast neprechádza ich telom bez zmeny, ale je degradovaný konkrétnymi bakteriálnymi kmeňmi (*Enterobacter asburiae* YT1 a *Bacillus sp.* YP1) prítomnými v ich tráviacom ústrojenstve. Izolované baktérie YT1 a YP1 (100 miliónov bakteriálnych buniek na mililiter) kultivované spolu s časticami PE (100 mg) sú schopné v priebehu 60 dní degradovať 6,1 % resp. 10,7 % tohto materiálu za vzniku biomasy a CO₂ (cit.⁷⁵). Mechanizmus sledovanej konverzie je stále predmetom aktuálnych štúdií. Taktiež bola pozorovaná degradácia polystyrénu larvami *Tenebrio molitor*, chovanej na zmiešanom substráte PS-otruby, u ktorej bola sledovaná nasledovná konverzia⁷⁴:



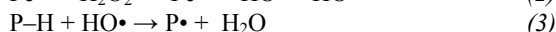
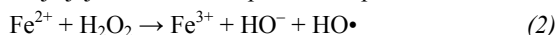
Detailný popis mechanizmu rozkladu PS ani rozbor mikrobiálnej kultúry larvy doposiaľ nie je známy.

Niektoré z plastov sú proti mikrobiálnemu ataku chránené antimikrobiálnymi prísadami. Sírne baktérie sú však schopné tvoriť na ich povrchu biofilm a vylučovať kyselinu sírovú, ktorá je schopná niektoré náchylnejšie materiály, napr. nylon, narušovať. Principiálne rovnako môžu byť na degradáciu plastových materiálov využívané niektoré druhy húb vyznačujúce sa sekréciou kyselín⁷³. Účinným degradačným reagentom, produkovaným endofytickou hubou *Pestalotiopsis microspore*, je i enzým serínhydroláza (SH), vďaka ktorému je huba schopná využívať ako zdroj živín polyester polyuretán (PUR), a to tak v aeróbnych ako i anaeróbných podmienkach. Týmto spôsobom môže byť PUR rozkladaný v širokom rozmedzí hĺbkového profilu pôdy⁷⁶. Enzymatickej degradácii podlieha i polyetylén-tereftalát (PET). V roku 2016 bola na povrchu odpadu PET identifikovaná nová baktéria *Ideonella sakaiensis* schopná hydrolyzovať PET pomocou dvoch inherentných enzýmov na monoméry etylénglykol a kyselinu tereftalátovú⁷³.

Prerastanie fungálnych filamentov hlbšie do štruktúry plastového odpadu, na ktorom rastú, prispieva k jeho frag-

mentovaniu za súčasného zväčšovania dostupného povrchu, ktorý sa tak stáva náchylným na hlbšiu biotickú alebo abiotickú degradáciu.

Abiotická degradácia zahŕňa narušenie plastových materiálov účinkom mechanických síl, teploty, svetla, plynov a vody. Napriek aditívnym chemickým látkam obsiahnutým v plastoch za účelom zlepšenia ich prírodných vlastností, vykazujú i tieto plastové materiály prirodzené nedostatky, ktoré súvisia priamo s ich štruktúrou⁷³. PET je náchylný podliehať hydrolyze vo vlhkom prostredí pri vyšších teplotách. Krehké plasty ako nízko hustotný a vysoko hustotný polyetylén (LDPE, HDPE) sú citlivé na mechanickú záťaž a fotooxidáciu. PP má tendenciu lámať sa pri nízkych teplotách a taktiež je náchylný na termálnu oxidáciu. Oxidačným procesom podlieha i PVC (cit.⁷³). Fentonova reakcia, participujúca i na biochemických procesoch, je schopná postupne degradovať tento materiál za vzniku nízkomolekulových chlórovaných fragmentov, ako sú *trans*-1,2-dichlóretylén, *cis*-1,2-dichlóretylén, trichlóretylén a tetrachlóretylén. Uvádzané rozkladné produkty sa považujú za perzistentné polutanty životného prostredia. Mechanizmus degradácie polymérov (P–H) Fentonovou reakciou, za účasti hydroxylových (HO•), peroxylových (POO•), alkoxylových (PO•) a alkylových (P•) radikálov, naznačuje jej možnú širokospektrálnu aplikáciu⁷⁸.



Vo všeobecnosti sú polyméry ako PE, PP, PS a PVC náchylnejšie na abiotickú degradáciu. Fotooxidácia PE, PP a PS vedie k zníženiu ich molekulovej hmotnosti a vzniku karboxylových skupín na konci reťazca. UV žiarenie je schopné iniciovať dechloráciu PVC. Polyméry PET a PU obsahujúce v hlavnom reťazci heteroatómy náchylne podliehajú hydrolyze. Polymérne fragmenty s nižšou molekulovou hmotnosťou môžu následne podstúpiť biodegradáciu. V životnom prostredí môže dochádzať k simultánnemu účinku niekoľkých degradačných ciest, za súčasnej fluktuácie reakčných podmienok, čo vedie k vzniku rôznych degradačných produktov, vrátane mikroplastov⁷⁹.

6. Záver

Koncentrovanie plastov vo svetových moriach a oceánoch popisujú štúdie už zo začiatku tohto tisícročia. Centrum pozornosti súčasného environmentálneho výskumu čoraz viac zastávajú ich mikro- až nanofragmenty. Odborné štúdie podčiarkujú problematiku makro i mikroplastov a ich možný negatívny vplyv, čím podnecujú výrobcov plastov a kozmetiky k nachádzaniu ekologických alternatív mikroplastov vo svojich výrobkoch. Distribúcia i správanie sa doposiaľ emitovaných mikročastíc v životnom prostredí však stále vyvoláva mnoho otázok, podobne ako je to i pri iných mikropolutantoch. Výskum tejto oblasti teda naďalej zostáva veľkou výzvou.

Zoznam skratiek

ČOV	čistiareň odpadových vôd
DDT	dichlórdifenyiltrichlórmétán
PAH	polyaromatické uhľovodíky
PCB	polychlorované bifenyly
PCL	polykaprolaktón
PE	polyetylén
PET	polyetyléntereftalát
PHB	polyhydroxybutyrát
PLA	kyselina polymliečna
POPs	perzistentné organické polutanty
PP	polypropylén
PS	polystyrén
PVC	polyvinylchlorid

Tento článok vznikol vďaka podpore projektu Vedeckej grantovej agentúry VEGA 1/0772/16 a grantovej schéme na podporu mladých výskumníkov STU v Bratislave: „Mikroplasty a ich účinné odstránenie pomocou progresívnych postupov.“

LITERATÚRA

- Crawford C. B., Quinn B., v knihe: *Microplastic Pollutants*, kap. 1. Elsevier, Amsterdam 2017.
- Andrady A. L., Neal M. A.: *Philos. Trans. R. Soc., B* 364, 1977 (2009).
- Biron M., v knihe: *Industrial Applications of Renewable Plastics*, kap.8. Elsevier, Amsterdam 2017.
- Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L.: *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017).
- Plastic Europe: The Compelling Facts About Plastics: An analysis of plastic production, demand and recovery for 2006 in Europe, <http://www.plasticseurope.org/en>, stiahnuté 15. 2. 2018.
- Plastic Europe: Plastics – the Facts 2017: An analysis of European plastics production, demand and waste data, <http://www.plasticseurope.org/en>, stiahnuté 15. 2. 2018.
- Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K. L.: *Science* 347, 768 (2015).
- da Costa J. P.: *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 1, 12 (2018).
- Jiang J.-Q.: *Sustain. Prod. Consump.* 13, 16 (2018).
- Crawford C. B., Quinn B., v knihe: *Microplastic Pollutants*, kap. 5. Elsevier, Amsterdam 2017.
- Carpenter E. J., Smith Jr. K. L.: *Science* 175, 1240 (1972).
- Rios Mendoza L. M., Karapanagioti H., Álvarez N. R.: *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 1, 47 (2018).
- Gasperi J., Wright S. L., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Kelly F. J., Tassin B.: *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 1, 1 (2018).
- Li J., Liu H., Chen J. P.: *Water Res.* 137, 362 (2017).
- Fendall L. S., Sewell M. A.: *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1225 (2009).
- Lechner A., Ramler D.: *Environ. Pollut.* 200, 159 (2015).
- Gregory M. R.: *Mar. Pollut. Bull.* 32, 867 (1996).
- UNEP: Plastic in Cosmetics, <http://www.cep.unep.org/>, stiahnuté 15. 2. 2018.
- Derraik J. G.: *Mar. Pollut. Bull.* 44, 842 (2002).
- da Costa J. P., Duarte A. C., Rocha-Santos T. A. P., v knihe: *Comprehensive Analytical Chemistry*, kap. 1. Elsevier, Amsterdam 2017.
- Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T. S.: *Mar. Pollut. Bull.* 62, 2588 (2011).
- Ryan P. G., Moore C. J., van Franeker J. A., Moloney C. L.: *Philos. Trans. R. Soc., B* 364, 1999 (2009).
- Browne M. A., Galloway T., Thompson R.: *Integr. Environ. Assess. Manage.* 3, 559 (2007).
- Talsness C. E., Andrade A. J., Kuriyama S. N., Taylor J. A., von Saal F. S.: *Philos. Trans. R. Soc., B* 364, 2079 (2009).
- Andrady A. L.: *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1596 (2011).
- Moore C. J.: *Environ. Res.* 108, 131 (2008).
- Barnes D. K., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M.: *Philos. Trans. R. Soc., B* 364, 1985 (2009).
- Yu X., Ladewig S., Bao S., Toline C. A., Whitmire S., Chow A. T.: *Sci. Total. Environ.* 613-614, 298 (2018).
- Galgani F., Task Group 10 Report: Marine litter, <https://ec.europa.eu/>, stiahnuté 15. 2. 2018.
- Ren X.: *J. Clean. Prod.* 11, 27 (2003).
- Roy P. K., Hakkarainen M., Varma I. K., Albertsson A.-C.: *Environ. Sci. Technol.* 45, 4217 (2011).
- Avio C. G., Gorbi S., Regoli F.: *Mar. Environ. Res.* 128, 2 (2017).
- da Costa J. P., Santos P. S. M., Duarte A. C., Rocha-Santos T.: *Sci. Total. Environ.* 566-567, 15 (2016).
- Agency T. D. E. P.: Microplastics – Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark <http://mst.dk/> stiahnuté 10. 2. 2018.
- Talvitie J., Heinonen M., Paakkonen J. P., Vahtera E., Mikola A., Setälä O., Vahala R.: *Water. Sci. Technol.* 72, 1495 (2015).
- Estahbanati S., Fahrenfeld N. L.: *Chemosphere* 162, 277 (2016).
- Carr S. A., Liu J., Tesoro A. G.: *Water. Res.* 91, 174 (2016).
- Moore C. J., Moore S. L., Weisberg S. B., Lattin G. L., Zellers A. F.: *Mar. Pollut. Bull.* 44, 1035 (2002).
- Retama I., Jonathan M. P., Shruti V. C., Velumani S., Sarkar S. K., Roy P. D., Rodríguez-Espinosa P. F.: *Mar. Pollut. Bull.* 113, 530 (2016).
- Zalasiewicz J., Waters C. N., Ivar do Sul J. A., Corcoran P. L., Barnosky A. D., Cearreta A., Edgeworth M., Galuszka A., Jeandel C., Leinfelder R.: *Anthropocene* 13, 4 (2016).
- Dekiff J. H., Remy D., Klasmeier J., Fries E.: *Environ. Pollut.* 186, 248 (2014).
- Zobkov M., Esiukova E.: *Mar. Pollut. Bull.* 114, 724 (2017).

43. Mohamed Nor N. H. and Obbard J. P.: *Mar. Pollut. Bull.* 79, 278 (2014).
44. Karami A., Golieskardi A., Ho Y. B., Larat V., Salamatinia B.: *Sci. Rep.* 7, 5473 (2017).
45. Boucher C., Morin M., Bendell L. I.: *Reg. Stud. Mar. Sci.* 3, 1 (2016).
46. Alomar C., Estarellas F., Deudero S.: *Mar. Environ. Res.* 115, 1 (2016).
47. Cai L., Wang J., Peng J., Tan Z., Zhan Z., Tan X., Chen Q.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 24928 (2017).
48. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B.: *Mar. Pollut. Bull.* 104, 290 (2016).
49. Dris R., Gasperi J., Mirande C., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Tassin B.: *Environ. Pollut.* 221, 453 (2017).
50. Obbard R. W., Sadri S., Wong Y. Q., Khitun A. A., Baker I., Thompson R. C.: *Earth's Future* 2, 315 (2014).
51. Horton A. A., Walton A., Spurgeon D. J., Lahive E., Svendsen C.: *Sci. Total. Environ.* 586, 127 (2017).
52. Rillig M. C., Ingrassia R., de Souza Machado A. A.: *Front. Plant. Sci.* 8, 1805 (2017).
53. Huerta Lwanga E., Gertsen H., Gooren H., Peters P., Salánki T., van der Ploeg M., Besseling E., Koelmans A. A., Geissen V.: *Environ. Sci. Technol.* 50, 2685 (2016).
54. Rillig M. C., Ziersch L., Hempel S.: *Sci. Rep.* 7, 1362 (2017).
55. Cole M., Lindeque P., Fileman E., Halsband C., Goodhead R., Moger J., Galloway T. S.: *Environ. Sci. Technol.* 47, 6646 (2013).
56. Setälä O., Fleming-Lehtinen V., Lehtiniemi M.: *Environ. Pollut.* 185, 77 (2014).
57. Graham E. R., Thompson J. T.: *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 368, 22 (2009).
58. Eerkes-Medrano D., Thompson R. C., Aldridge D. C.: *Water Res.* 75, 63 (2015).
59. Fossi M. C., Marsili L., Bainsi M., Giannetti M., Coppola D., Guerranti C., Caliani I., Minutoli R., Lauriano G., Fioia M. G.: *Environ. Pollut.* 209, 68 (2016).
60. Wright S. L., Rowe D., Thompson R. C., Galloway T. S.: *Curr. Biol.* 23, R1031 (2013).
61. Greven A. C., Merk T., Karagoz F., Mohr K., Klapper M., Jovanovic B., Palic D.: *Environ. Toxicol. Chem.* 35, 3093 (2016).
62. Lönnstedt O. M., Eklöv P.: *Science* 352, 1213 (2016).
63. Berg J.: *Science* 356, 812 (2017).
64. Teuten E. L., Saquing J. M., Knappe D. R. U., Barlaz M. A., Jonsson S., Björn A., Rowland S. J., Thompson R. C., Galloway T. S.: *Philos. Trans. R. Soc., B* 364, 2027 (2009).
65. Petrová Š., Soudek P.: Vaněk T.: *Chem. Listy* 109, 679 (2015).
66. Čorňák Š., Jarošová A., Puškárová L.: *Chem. Listy* 107, 960 (2013).
67. Crawford C. B., Quinn B.: *Microplastic Pollutants*, kap. 8. Elsevier, Amsterdam 2017.
68. Zarfl C., Matthies M.: *Mar. Pollut. Bull.* 60, 1810 (2010).
69. Holmes L. A., Turner A., Thompson R. C.: *Environ. Pollut.* 160, 42 (2012).
70. Chua E. M., Shimeta J., Nugegoda D., Morrison P. D., Clarke B. O.: *Environ. Sci. Technol.* 48, 8127 (2014).
71. Barboza L. G. A., Vieira L. R., Branco V., Figueiredo N., Carvalho F., Carvalho C., Guilhermino L.: *Aquat. Toxicol.* 195, 49 (2018).
72. Batel A., Linti F., Scherer M., Erdinger L., Braunbeck T.: *Environ. Toxicol. Chem.* 35, 1656 (2016).
73. Crawford C. B., Quinn B., v knihe: *Microplastic Pollutants*, kap. 4. Elsevier, Amsterdam 2017.
74. Yang S. S., Brandon A. M., Andrew Flanagan J. C., Yang J., Ning D., Cai S. Y., Fan H. Q., Wang Z. Y., Ren J., Benbow E.: *Chemosphere* 191, 979 (2018).
75. Yang J., Yang Y., Wu W. M., Zhao J., Jiang L.: *Environ. Sci. Technol.* 48, 13776 (2014).
76. Russell J. R., Huang J., Anand P., Kucera K., Sandoval A. G., Dantzler K. W., Hickman D., Jee J., Kimovec F. M., Koppstein D.: *Appl. Environ. Microbiol.* 77, 6076 (2011).
77. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaji H., Maeda Y., Toyohara K., Miyamoto K., Kimura Y., Oda K.: *Science* 351, 1196 (2016).
78. Mackuľák T., Takáčová A., Gál M., Marton M., Ryba J.: *Polym. Degrad. Stab.* 120, 226 (2015).
79. Gewert B., Plassmann M. M., MacLeod M.: *Environ. Sci.: Processes Impacts* 17, 1513 (2015).
80. Lépesová K., Mackuľák T., Birošová L.: *Chem. Listy* 111, 374 (2017).

A. Grenčíková^a, P. Brandeburová^a, J. Ryba^b, S. Vlčková^a, and T. Mackuľák^a (^aDepartment of Environmental Engineering, Institute of Chemical and Environmental Engineering, ^bDepartment of Polymer Processing, Institute of Natural and Synthetic Polymers, Faculty of Chemical and Food Technology, Slovak University of Technology, Bratislava): **Microplastics as an Environmental Risk**

Microplastics are abundant and widespread within the marine environment, being found in their highest concentrations along coastlines and within mid-ocean gyres. Ingestion of microplastics has been demonstrated in a range of marine organisms. This process may facilitate the transfer of chemical additives or hydrophobic waterborne pollutants to biota. This review discusses the mechanisms of generation and potential impacts of microplastics in the environment.

Keywords: microplastics, occurrence and behaviour, main sources, ecotoxicity, food chain