



Š. Ukić,* D. Kučić Grgić i M. Cvetnić

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb

Plastika – ekološki aspekti

Riječ plastika izvorno označava nešto što je savitljivo, odnosno lako ju je oblikovati.¹ S vremenom, ta riječ postala je sinonim za jedan od najzastupljenijih materijala u modernom društvu. Treba istaknuti da plastika nije jedna tvar, već jedinstven naziv za čitav skup polimernih materijala.

Začetkom plastike smatraju se 1860-e. Iskorak u tzv. "plastično doba" vezuje se uz Alexandera Parkesa, engleskog metalurga i izumitelja, koji je 1862. iz celuloze proizveo novi materijal nazvan parkezin kao jeftinu zamjenu za gumu. Godine 1866. Parkes je pokrenuo industrijsku proizvodnju, no tvrtka je relativno brzo bankrotirala. Parkesova istraživanja nastavio je suradnik Daniel Spill, koji se posvećuje proizvodnji ivorida i ksilonita, dviju tvari veoma sličnih parkezinu. Otprilike u isto vrijeme, američki izumitelj John Wesley Hyatt, javljajući se na bogat javni natječaj u kojem su investitori tražili zamjenski materijal za bjelokost, predlaže nitrocelulozu kombinirajući ju s kamforom kao plastifikatorom i dobiva celuloid.² Sljedeći veliki korak ostvaren je 40-ak godina kasnije, konkretno 1907. kada je belgijski kemičar Leo Hendrik Baekeland proizveo bakelit, prvu u potpunosti sintetsku plastiku.¹ Nedugo nakon toga, 1920-ih, započinje prava prva industrijska proizvodnja plastike.³ Izrazita ekspanzija proizvodnje, do koje dolazi koncem prve polovice 20. stoljeća, nije jenjala do današnjih dana, pa je tako svjetska proizvodnja plastike u 2019. iznosila 368 milijuna tona, a za narednih 20-ak godina predviđa se njezino udvostručenje. Glavnina proizvodnje povezana je s najrazvijenijim zemljama svijeta, pa tako 16 % svjetske proizvodnje plastike otpada na Europu, 19 % na Sjevernu Ameriku, a čak 51 % na Aziju.⁴ Od ukupno proizvedene plastike oko 80 % otpada na pet najzastupljenijih vrsta: polietilen, poli(etilen-tereftalat), polipropilen, polistiren i poli(vinil-klorid).⁵

Zbog svojih izvrsnih karakteristika: dobrih mehaničkih svojstava, kemijske inertnosti, male težine te niske cijene, plastika se danas upotrebljava gotovo u svim aspektima ljudskog života. Samim time, neminovno se povećava i količina plastičnog otpada koji završava u okolišu. Upotreba plastičnih materijala donijela je ogromne društvene koristi, pa je stoga dugo vremena utjecaj plastike u okolišu bio ekološki marginaliziran uz eventualni naglasak na estetskom aspektu odbačene plastike u okolišu. Međutim, u posljednjih nekoliko desetljeća otkriveni su određeni negativni učinci koji su izazvali globalnu zabrinutost, pogotovo uvažavajući činjenicu da se zbog kemijske inertnosti plastika lako akumulira u okolišu. Iako plastični otpad danas možemo pronaći u gotovo svim ekosustavima, od osobitog interesa ekologa je vodeni okoliš budući su u njemu organizmi u veoma izravnom kontaktu s plastikom. Smatra se da godišnje u jezerima i oceanima u prosjeku završi oko 8 milijuna tona plastičnog otpada.⁶ U današnje vrijeme velika pozornost usmjerena je na sitne čestice plastike promjera manjeg od 5 mm, poznate pod nazivom mikroplastika, koje organizmi, zbog malih dimenzija čestica, znatno lakše gutaju. Na taj način povećava se izloženost organizma plastici, što može izazvati neželjene učinke na organizam i potencijalno ga opteretiti

toksičnim spojevima. Pretpostavlja se da mikroplastika danas čini čak 92,4 % ukupnog plastičnog otpada.⁷ Mnoge zemlje svijeta prepoznale su mikroplastiku kao novo onečišćivalo kojem posvećuju sve veću pozornost. Povećan pritisak javnosti, prisutan posljednjih godina, natjerao je mnoge tvrtke i vlade da reagiraju te reguliraju ili čak zabrane uporabu mikroplastike.

Mikroplastika općenito može imati dvojako porijeklo, pa ju s obzirom na porijeklo dijelimo na primarnu i sekundarnu mikroplastiku. Primarna mikroplastika proizvodi se namjenski i može se naći u tekstilu, medicini ili proizvodima za osobnu njegu. Sekundarna mikroplastika nastaje fragmentacijom većih plastičnih objekata uslijed uporabe ili razgradnje (mehanička fragmentacija, foto- i termo-razgradnja, kemijska oksidacija i biorazgradnja). Postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda potencijalno su jedan od bitnih izvora mikroplastike u okolišu. Naime, čestice mikroplastike koje se nalaze u proizvodima za osobnu njegu (pilingima za čišćenje lica, zubnim pastama...) dospijevaju u sirovu otpadnu vodu koja dolazi u postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. Zbog svojih malih dimenzija dio čestica može zaobići proces obrade i kao dio efluenta dospjeti u okoliš. S druge pak strane, preostali dio mikroplastike zaostaje u mulju postrojenja. Budući da se mulj iz postrojenja za obradu voda često primjenjuje kao gnojivo na poljima, primjenom mulja obogaćenog mikroplastikom ponovno unosimo mikroplastiku u okoliš.

Povećana prisutnost mikroplastike u ekosustavu povećava njezinu bioraspodivnost; naime izravno se povećava mogućnost susreta organizama s česticama mikroplastike. Mnogi organizmi, uključujući i ljude, mogu progutati čestice mikroplastike, što potom može izazvati toksične učinke kroz različite načine djelovanja. Mikroplastika može otpustiti otrovne plastifikatore i adsorbirane onečišćujuće tvari (razne toksine iz vode) koji mogu uzrokovati endokrine poremećaje, odgođenu ovulaciju, hepatički stres pa čak i smrt.^{8,9} Također, čestice mikroplastike odlična su baza za kolonizaciju mikroba i potpora njihovu rastu, a neki od mikroba mogu biti patogeni.

Biološka obrada

Činjenica da neki od mikroorganizama potencijalno mogu upotrebljavati plastiku kao izvor energije, temelj je bioremedijacijskog pristupa uklanjanju mikroplastike. Prilikom biorazgradnje plastike iznimnu ulogu ima formiranje biofilma na površini plastike. Biofilmovi su kompleksne zajednice mikroorganizama sastavljene od bakterija, arheja i mikrobnih eukariota pričvršćenih za površinu i smještenih u izvanstaničnoj polimernoj matrici (izlučevine mikroorganizama). Heterotrofni mikroorganizmi koji sudjeluju u stvaranju biofilma bitni su kod uklanjanja organskih tvari iz vodenih sustava, što uključuje i mikroplastiku. Prema literaturi, bakterije *Bacillus* sp., *Rhodococcus* sp.,¹⁰ *Pseudomonas putida*, *Streptomyces* sp. i *Staphylococcus* sp.,¹¹ kao i gljive *Aspergillus niger*, *Penicillium* sp.¹² i *Phanerochaete chrysosporium*,¹³ imaju mogućnost razgradnje mikroplastike, međutim proces je iznimno spor. Ipak, primjena mikroorganizama u razgradnji mikroplasti-

* Autor za dopisivanje: Izv. prof. dr. sc. Šime Ukić
e-pošta: sukic@fkit.hr

ke smatra se ekološki potpuno prihvatljivim pristupom te samim time ima obećavajuću budućnost.

Obrada naprednim oksidacijskim procesima

Konvencionalni biološki procesi obrade voda ne daju uvijek zadovoljavajuće rezultate razgradnje, osobito za postojane organske spojeve koji, uz to što su otporni na biološku obradu, nerijetko znaju biti i toksični. Jedna od mogućih opcija za remedijaciju voda koje sadrže takve biološki nerazgradive ili slabo razgradive tvari je primjena naprednih tehnologija obrade temeljenih na kemijskoj oksidaciji (tzv. napredni oksidacijski procesi; engl. *Advanced Oxidation Processes*, AOP). Glavni je mehanizam na kojem se temelje AOP-i stvaranje visoko reaktivnih slobodnih radikala *in-situ*. Pod pojmom AOP-a svrstane su mnoge metode koje kombiniraju jaka oksidacijska sredstva s katalizatorima i elektromagnetskim zračenjem. Najpopularnije i zasad najučinkovitije AOP tehnologije za uklanjanje mikroplastike su Fentonov proces, foto-Fentonov proces, fotokataliza, UV-C fotoliza te UV-C foto-oksidacija uz upotrebu H₂O₂ ili S₂O₈²⁻ kao oksidansa. Upotreba H₂O₂ ne predstavlja značajan rizik za okoliš, a osobito bezopasnim i ekološki prihvatljivim smatraju se sulfatni ioni koji su glavni produkti u tretmanu persulfatnim reagensom. Upotreba AOP-a može biti iznimno korisna po okoliš jer dovodi do djelomične mineralizacije organskog sadržaja uz smanjenje toksičnosti i povećanje biorazgradivosti obrađene vode. Međutim, oksidacija je izrazito neselektivan proces, pa posljedično taj tretman zahtijeva relativno veliku potrošnju oksidansa, što dovodi u pitanje njegovu ekonomičnost. Također, znanje o kemizmu reakcija mikroplastike s određenim oksidansom, kinetikama i konstantama brzina reakcija te mehanizmima razgradnje još je uvijek vrlo oskudno. Stoga je navedene čimbenike potrebno istražiti budući da snažno utječu na ukupnu učinkovitost procesa razgradnje, a time i na rizik koji po okoliš donosi primjena pojedine tehnologije obrade voda.

Kombinacija AOP-a i biološke obrade

Već dulje vrijeme poznato je da se biorazgradivost otpadnih voda mijenja ako su prethodno podvrgnute kemijskoj oksidaciji. Prema tome, potencijalna i vrlo pogodna primjena AOP-a je u vidu predobrade procesima biološke razgradnje. AOP ima potencijal konvertirati tvari koje su inicijalno otporne na biološku obradu u biorazgradive produkte koji se potom mogu dalje tretirati biološki uz znatno niže troškove. Postotak mineralizacije tijekom predobrade trebao bi biti minimalan da se izbjegne nepotrebna potrošnja kemikalija i energije te time zadrže niski operativni troškovi. Međutim, ako je vrijeme AOP predobrade prekratko, produkti razgradnje mogu biti tvari koje su strukturom i karakteristikama vrlo slične izvornim tvarima.

Uklanjanje primjenom membranskih procesa

Jedna od mogućnosti uklanjanja mikroplastike iz pitkih i otpadnih voda je primjenom tlačnih membranskih procesa. Ti procesi uključuju mikrofiltraciju, ultrafiltraciju, nanofiltraciju, reverznu osmozu i primjenu membranskog bioreaktora. Navedeni procesi razdvajaju čestice na temelju njihove veličine i to od nekoliko angstroma do nekoliko mikrona, počevši od reverzne osmoze koja osigurava najfiniji stupanj odvajanja, do mikrofiltracije koja odvađa čestice mikronskih veličina.

Naposlijetku, valja istaknuti da i hrvatska znanstvena zajednica prati ekološke trendove te provodi intenzivna istraživanja vezana uz prisutnost mikroplastike u okolišu i načine njezina efektivnog uklanjanja. Ovom prilikom istaknuo bih projekt Primjena naprednih tehnologija obrade voda za uklanjanje mikroplastike (AdWaTMiR, <https://www.fkit.unizg.hr/AdWaTMir>) voditelja prof. Tomislava Bolanče s Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Taj projekt, koji se provodi od 2019., financira Hrvatska zaklada za znanost. U sklopu projekta okupljen je multidisciplinarni tim znanstvenika iz zemlje i inozemstva, koji nastoje na inovativan način kombinirati postojeće tehnike uklanjanja mikroplastike iz voda te na taj način poboljšati efikasnost njenog uklanjanja.

Literatura

1. URL: <https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics> (pristupljeno 20. srpnja 2021.)
2. J. R. Lerma Valero, *Plastics Injection Molding*, Hanser, Cincinnati, USA, 2020.
3. URL: <https://www.theglobalist.com/the-rise-of-plastic/> (pristupljeno 20. srpnja 2021.)
4. PlasticsEurope, *Plastics – the Facts 2020*. An analysis of European plastics production, demand and waste data, URL: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020> (pristupljeno 20. srpnja 2021.)
5. L. M. R. Mendoza, M. Balcer, *Microplastics in freshwater environments: a review of quantification assessment*, *Trend. Anal. Chem.* **113** (2019) 402–408, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.020>.
6. URL: <https://theconversation.com/eight-million-tonnes-of-plastic-are-going-into-the-ocean-each-year-37521> (pristupljeno 22. srpnja 2021.)
7. M. F. M. Santana, L. G. Ascer, M. R. Custódio, F. T. Moreira, A. Turra, *Microplastic contamination in natural mussel beds from a Brazilian urbanized coastal region: rapid evaluation through bioassessment*, *Mar. Pollut. Bull.* **106** (2016) 183–189, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.074>.
8. H. Auta, C. Emenike, S. Fauziah, *Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential, solutions*, *Environ. Int.* **102** (2017) 165–176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>.
9. J.-Q. Jiang, *Occurrence of microplastics and its pollution in the environment: A review*, *Sustain. Prod. Consum.* **13** (2018) 16–23, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.11.003>.
10. H. S. Auta, C. U. Emenike, B. Jayanthi, S. H. Fauziah, *Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment*, *Mar. Pollut. Bull.* **127** (2018) 15–21, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>.
11. G. Caruso, *Plastic degrading microorganisms as a tool for the bioremediation of plastic contamination in aquatic environments*, *J. Pollut. Eff. Control* **3** (2015) e112, doi: <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000e112>.
12. T. Volke-Sepulveda, G. Saucedo-Castaneda, M. Gutierrez-Rojas, A. Manzur, E. Favela-Torres, *Thermally treated low density polyethylene biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger**, *J. Appl. Polym. Sci.* **83** (2001) 305–314, doi: <https://doi.org/10.1002/app.2245>.
13. Y. Orhan, H. Buyukgungor, *Enhancement of biodegradability of disposable polyethylene in controlled biological soil*, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **45** (2000) 49–55, doi: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00048-2).