

Az extrudált polisztirol alapú csomagolóanyagok kockázati tényezői az élelmiszer-biztonság és a környezet szempontjából

Répás Zoltán^{ID}

Debreceni Egyetem, Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar, Táplálkozástudományi Intézet,
Debrecen, Magyarország
E-mail: repas.zoltan@agr.unideb.hu

Beérkezett: 2025. április 14.; elfogadva: 2025. május 27.

Összefoglalás

Az extrudált polisztirol (XPS) alapú csomagolóanyagokat az élelmiszeripar széleskörűen alkalmazza. A fizikai aprózódás révén mikroműanyag keletkezik, amely bejuthat az élő szervezetekbe. A tanulmány célja az XPS-ből készült csomagolóanyagok élelmiszer-biztonsági és környezeti kockázatainak értékelése, valamint az ezekkel kapcsolatos potenciális veszélyek azonosítása kvalitatív belső dokumentumelemzés módszerével. Az elemzés számos kockázati tényezőt azonosított, amelyek egészségkárosító hatásúak. A kioldódó anyagok megjelenhetnek a zsigeri szervekben és az agyban. A gyártókat eltérő törvénykezés szabályozza. Következésképpen az XPS-alapú élelmiszer-csomagolóanyagok élelmiszer-biztonsági és környezetvédelmi kockázatokat hordoznak magukban.

Kulcsszavak: extrudált polisztirol, mikroműanyag, élelmiszer-biztonság, környezetvédelem

The risks of extruded polystyrene-based packaging materials for food safety and the environment

Zoltán Répás

Institute of Nutritional Science, Faculty of Agricultural and Food Sciences and Environmental Management,
University of Debrecen, Debrecen, Hungary

Summary

This study presents a detailed overview of the use of extruded polystyrene (XPS) packaging materials, which is a widely used base and packaging material, extensively utilized by the food industry. Their popularity stems from several advantageous properties, including low weight, mechanical strength, cost efficiency, and outstanding thermal insulation. These attributes make XPS particularly suitable for single use food containers, trays, and transport packaging, where functionality and low production cost are crucial. However, despite these benefits, XPS is a biologically nondegradable plastic, and its accumulation in waste contributes to long-term environmental stress. Over time, XPS breaks down into microplastics – particles smaller than 5 micrometers – that are now commonly found in soil, water, and sewage sludge. These microplastics are easily dispersed in the environment and can enter living organisms, where they may accumulate and exert harmful effects. A particularly concerning aspect is the generation of nanoplastics, particles smaller than 50 nanometers. Due to their minuscule size, they are capable of penetrating biological membranes, entering the bloodstream, and even crossing the blood-brain barrier. This raises serious health concerns, as such particles may accumulate in tissues, interfere with cellular functions, disrupt metabolic processes, and potentially cause long-term physiological damage.

Chemical risks are also associated with the use of XPS in food packaging. During manufacturing, various chemicals such as styrene and bisphenol A (BPA) are used, which can migrate into food products – especially when in contact with fatty or oily substances. Styrene is rapidly absorbed by the human body and, although it does not accumulate,

it may still pose health risks. BPA, on the other hand, is a well-known endocrine disruptor and is associated with increased risk of hormonal imbalance and cancer. These risks highlight the importance of monitoring chemical migration from packaging into food.

The environmental impact of XPS is further exacerbated by its presence in marine ecosystems. Studies of plastic debris washed up on shores have identified elements such as iron, titanium, and bromine in XPS samples, originating from manufacturing residues or environmental contamination. Experiments with fish have shown that polystyrene microplastics can cross the blood-brain barrier, resulting in behavioral changes and structural abnormalities. In human tissues, similar particles may interfere with cellular metabolism, affect platelet function, and accumulate in organs, potentially leading to chronic health conditions.

In conclusion, while XPS packaging materials offer clear advantages in terms of practicality and cost, their use raises significant concerns regarding food safety and environmental sustainability. Addressing these issues is essential for protecting both of human health and the environment.

Keywords: extruded polystyrene, microplastics, food safety, environmental protection

Bevezetés

Az extrudált polisztirol (XPS) napjainkban világszerte széleskörűen elterjedt csomagoló alapanyag, az élelmiszer- és a vendéglátóipar egyaránt felhasználja. Az XPS-alapú anyagok alkalmazását számos előnyös tulajdonságuk indokolja. Legkedvezőbb jellemzőjük, hogy viszonylag kicsi a sűrűségük, mégis megfelelő szilárdsággal rendelkeznek. Költséghatékony alapanyagról van szó, ami az ipari felhasználás szempontjából rendkívül előnyös sajátosság, továbbá kiváló a hőszigetelő tulajdonsága. Fontos megjegyezni, hogy a polisztirol és származékainak élelmiszeripari alkalmazását szabályozó előírások országonként eltérnek. Az Európai Unió tagállamaiban felhasználásukat a 2019/904/EU irányelv szabályozza, amely különösebben nem korlátozza az extrudált polisztirolból készült termékek élelmiszer-csomagolóanyagként történő alkalmazását. Azonban érdemes megvizsgálni ezt a kérdést. Műanyagok felhasználása esetén nem hagyhatók figyelmen kívül a lehetséges fizikai, kémiai és biológiai veszélyek. Ezek az anyagok közvetlenül érintkeznek a különböző fizikai állapotú élelmiszerekkel, jelen vannak környezetünkben, élelmiszer-biztonsági és környezetvédelmi kockázatot jelenthetnek akár közvetlen, akár közvetett hatásaikon keresztül.

A tanulmány célja az extrudált polisztirolból készült csomagolóanyagok élelmiszer-biztonsági és környezeti kockázatainak értékelése, valamint az ezekkel kapcsolatos potenciális veszélyek azonosítása.

Vizsgálati anyag és módszer

A tanulmány a hazai és nemzetközi folyóiratokban megjelent releváns tudományos közlemények értékelésével, kvalitatív belső dokumentumelemzés módszerével készült. A vizsgált szakirodalmi források kiválasztásának szempontja az volt, hogy témájukat tekintve az XPS mint élelmiszer-csomagolóanyag felhasználása következtében fellépő, az élelmiszerek felületén és a környezetben megjelenő mikroműanyag-szennyezést írják le, továbbá a mikroműanyagból a fogyasztó szervezetébe és a környezetbe migráló kémiai anyagok biológiai hatásait

fejtsék ki részletesen. A közleményben összehasonlításra kerülnek továbbá az XPS gyártását és forgalmazását szabályozó különböző nemzeti törvények és rendeletek.

Vizsgálati eredmények és értékelés

Az extrudált polisztirol az ipar számos területén jelen van mint alap- és csomagolóanyag. A polisztirol hőállósága korlátozott, ugyanakkor jól ellenáll a savaknak, lúgoknak, valamint kedvező gáz- és nedvességáteresztő képességgel rendelkezik. Ezek a tulajdonságok előnyösek az élelmiszer-csomagolásként történő alkalmazás során (Umek et al. 2009; Ajaj et al. 2021). A polisztirol biológiailag nem lebomló műanyag, így a szemétben vagy a hulladékban történő megjelenése állandó terhelést jelent a környezet számára (Kang et al. 2018). Eloszlását és kontrollálatlan terjedését segíti, hogy kis sűrűségének köszönhetően úszik a vizek felszínén, és a szél is könnyen szállítja.

A műanyagok környezeti lebomlásának eredménye a mikroműanyag (méretük 5 µm-nél kisebb) (Hernandez-Yousefi-Tufenkji 2017; Da Costa et al. 2016). Az Európai Unió 10/2011. számú, az élelmiszerekkel rendeltetészerűen érintkezésbe kerülő műanyagokról és műanyag tárgyairól szóló, európai gazdasági térség vonatkozású rendelete leírja, hogy az 1000 daltont meghaladó molekulatömegű anyagok rendszerint nem szívódnak fel az emberi szervezetben, ezért a polimerből eredő potenciális egészségügyi kockázatot minimálisnak értékeli. Ugyanakkor meghatározza, hogy a különböző technológiai okok miatt alkalmazott adalék anyagok esetében is el kell végezni az 1000 dalton alatti, kis molekulatömegű frakciók kockázatértékelését (10/2011/EU rendelet). A különböző környezeti hatások miatt a mikroműanyagok mérete azonban elérheti az 5 nm nagyságot is (Thompson et al. 2016). Az ilyen apró méretű anyag már könnyen átjut az élőlények védekezőrendszerén.

A mikro- és nanoméretű műanyag eredetű szennyeződések körülveszik az embert, ott vannak a környezetben, megtalálhatók a talajban, a folyókban, még a vizes élőhelyek iszapjában is lerakódnak (Pathan et al. 2020; Zhou et al. 2023). Ez megnöveli az élő szervezettel tör-

ténő találkozás esélyét, és a környezeti terhelés többszörös expozícióhoz vezethet. Egészségügyi kockázatot jelenthetnek a gyártás során nem vagy csak részlegesen reagáló monomerek és más kiindulási anyagok. Az élelmiszer tárolása során a kioldódás révén kis molekulatömegű adalék anyagok kerülhetnek a tároló műanyagból az élelmiszerbe. A kockázatértékelések során, a veszélyek azonosításakor figyelembe kell venni az újabb és újabb kutatások eredményeit. Az 1000 dalton molekulatömegnél kisebb méretű anyagok potenciálisan átjuthatnak a biológiai membránokon, majd a véráramba juthatnak. Ezek az anyagok kioldódásuk esetén már számottevő egészségügyi kockázatot jelenthetnek.

Egy termék anyaga alapvetően két forrásból származhat: tervezett és nem tervezett összetevőkből. A nem tervezett összetevők közé tartoznak a melléktermékek, szennyeződések és bomlástermékek, amelyek a gyártás során keletkezhetnek. Ezzel szemben a tervezetten hozzáadott összetevők közé sorolhatók a kiindulási vegyületek, oldószerek, katalizátorok és különböző adalék anyagok, például antioxidánsok, antisztatikus szerek, páragátlók, csúszásgátlók, lágyítók, hőstabilizátorok, színezékek, töltőanyagok, biocidok és UV-stabilizátorok (Groh et al. 2019). Az XPS alapanyaga a sztirol, amelynek polimerizációjával készül. Az etil-benzolból készülő sztirol polimerizációja peroxidok alkalmazásával, szabad gyökök képződésével történik. Az Európai Unióban különféle célokra gyártott XPS mennyisége 2019-ben elérte a 60 000 tonnát (Repak 2019). Kedvező tulajdonságai ellenére ipari eljárással, különféle kémiai anyagok felhasználásával készül, ami önmagában élelmiszer-biztonsági és környezetvédelmi kémiai veszélyt hordozhat. Ennek oka a különböző vegyi eredetű anyagok kioldódása. Az élelmiszerekben jelen lévő mikroműanyag-szennyeződések kimutatása folyamatos kihívást jelent a kutatók számára (Kwon et al. 2020).

Napjainkban egyre több technológia és analitikai eljárás mód létezik a kvalitatív és kvantitatív migráció megállapítására. Az SPME–GC–MS (Solid-Phase Microextraction – Gas Chromatography – Mass Spectrometry) az egyik használatos eljárás. Az SPME közvetlenül képes kivonni a sztirolt a migrációs oldatból; a GC–MS ezután azonosítja és kvantifikálja az egyes komponenseket (Peñalver et al. 2025). Az LC–MS/MS (Liquid Chromatography – Tandem Mass Spectrometry) technológiák ötvöztetése is alkalmas a kioldódó sztirol azonosítására és mennyiségének meghatározására (Zhang et al. 2022). Az úgynevezett Headspace GC–MS technológia kifejezetten hatékony a sztirol, benzol, toluol és egyéb aromás vegyületek azonosítására (Li et al. 2021).

A rendelkezésre álló adatok szerint évente akár több százezer mikroműanyag-részecskét is lenyel az ember (Udovicki et al. 2022). Szélsőséges esetekben ez a mennyiség elérheti a napi 1,5 milliót (Heo et al. 2024). A mikroműanyagok nemcsak az élelmiszereinkben, de a környezetünkben is jelen vannak. Ez a környezetkárosító expozíció túl többszörös terhelést gyakorol az ember

szervezetére (Borriello et al. 2023). A környezetben vagy az élelmiszerekben jelen lévő műanyagokból kioldódhatnak a kémiai elemek és alkotók (Katsara et al. 2022; Liu–Yang 2023).

A kémiai elemek migrációja több szakaszból áll. Először a polimereken keresztül a kémiai vegyületek diffúziója történik meg; ezt követi a diffundált molekulák deszorpciója a polimer felületéről, majd a vegyületek szorpciója zajlik a műanyag és az élelmiszer határfelületén, végül pedig megtörténik a vegyületek abszorpciója az élelmiszerbe (Emanuel–Buchachenko 1987). Az elmúlt években több tanulmány is feltárta, illetve leírta az ily módon történő szennyeződést. Egy 2020-ban megjelent közlemény szerint a friss baromfihúsok tárolása XPS-alapú tálcákon jelentős mértékű mikroműanyag-szennyeződést eredményezett (Kedzierski et al. 2020).

A mikroműanyag a környezetbe vagy a szervezetbe jutva potenciálisan magában hordozza a gyártás során felhasznált vegyi és egyéb anyagok kioldódásának lehetőségét. Az élelmiszerekben leggyakrabban a sztirol jelenik meg mint szennyező anyag (Rist et al. 2018). A sztirol a szervezetbe jutva rövid idő alatt felszívódik (Bonnard 2016). A zsírszövetekben tárolódik, ahol viszont gyorsan lebomlik (felezési ideje körülbelül hat óra). A lebomlás után főként a vizelettel távozik, és nem halmozódik fel a szervezetben. Kontou és munkatársai 2021-ben az általuk kifejlesztett HS–SPME–GC–MS/MS (Headspace – Solid-Phase Microextraction – Gas Chromatography – Tandem Mass Spectrometry) módszerrel huszonhárom polisztirol-alapú csomagolóanyag sztirolkoncentrációját vizsgálták (Kontou et al. 2021). Később a vizsgálatokat tizennégy polisztirolból készült étkezésre, illetve konyhai eszközre is kiterjesztették. Kutatásuk célja az volt, hogy meghatározzák a vízbe, a tejbe, a sajtba vagy a tejszínbe diffundált sztirol mennyiségét. A vizsgálati mintákat 2020-ban görögországi piacokról gyűjtötték. Eredményeik az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat | Élelmiszerek sztiroltartalma XPS csomagolóanyagban történő tárolás során

Anyag	Sztirolkoncentráció (ng/g)
Csomagolt élelmiszerek felülete	0,4–160
Gyermekeknek készült tejtermékek	46
72 °C-os tej két óra tárolás után	89

A habosított XPS-tálcába csomagolt élelmiszerek közül a húskészítmények érték el a legmagasabb sztirolkoncentráció-értékeket. Érdemes kiemelni, hogy a sztirol koncentrációja a polisztirol-csomagolású tejtermékek és desszertek 56 százalékában meghaladta a 10 ng/g mennyiséget. A legnagyobb mértékű szennyeződés a meleg termékek tárolása során alakult ki. Kontou és munkatársainak kutatási eredményei fontos támponttal

szolgálnak a fogyasztókat érintő potenciális sztirolexpozícióról, illetve az élelmiszerrel érintkező, XPS-alapú anyagokból származó sztirol szervezetbe jutásának kockázatáról (Kontou *et al.* 2021). Az olajos vagy zsíros jellegű ételek elősegítik a sztirol kioldódását (IARC 2019).

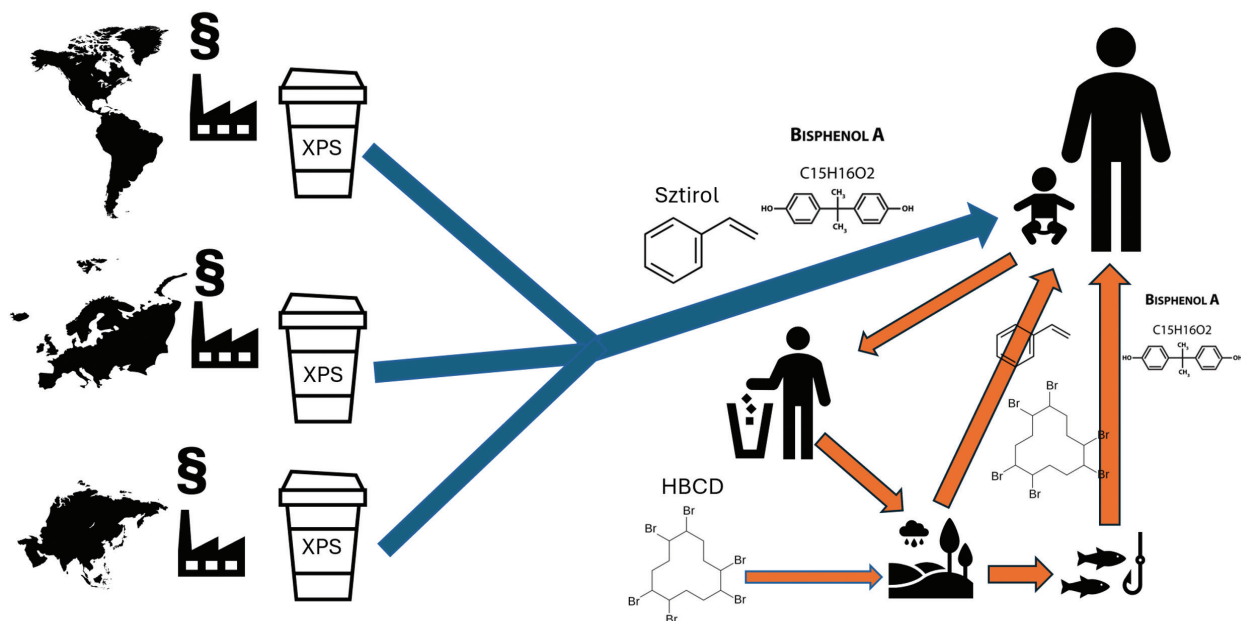
A délnyugat-angliai tengerparton a partra vetett műanyag hulladékon végzett vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a mintákban eltérő mennyiségben fordultak elő fémek, különösen a vas (Fe), a titán (Ti) és a cink (Zn) mennyisége volt jelentős. A közlemény szerzői szerint ezeknek az elemeknek a jelenléte részben a polisztirol előállítás során keletkező gyártási maradványoknak és pigmenteknek tulajdonítható, ugyanakkor – különösen a vas és a titán esetében – a környezetből származó ásványi anyagok és ionok felvételére is utal, ami a tengerben lebegve vagy a partra kivetve történhetett meg. A vizsgálat során a legtöbb minta felületén megfigyelhető volt kémiai, többnyire vas-oxid-eredetű elszíneződés. Ezek a vegyületek képesek más fémek, például az ólom (Pb) megkötésére, ami fokozott környezeti terhelést jelent (Lin *et al.* 2022). A vizsgálat során több mintában jelentős mennyiségű brómot (Br) mutattak ki, akár 11,5 g/kg-os koncentrációban, ami feltehetően az égéskésleltetőként használt hexabróm-ciklododekán (HBCD) jelenlétére utal (Turner 2021). A fémek ilyen jellegű jelenléte további kockázatot jelent az élővilág számára. Az XPS alapanyagú élelmiszer-csomagolóanyagokból különböző okok miatt kioldódó különféle vegyi anyagok elsődleges és másodlagos expozícióját az 1. ábra szemlélteti.

Az 50 nm-nél kisebb mikroműanyagok könnyen áthatolnak az emberi szervezet védekezőrendszerén, és felhalmozódhatnak a szervezetben (Revel–Châtel–Mouneyrac 2018). Halakon végzett kísérletek azt mutatták, hogy a megfelelően kis méretű, polisztirol-eredetű mikromű-

anyagok képesek átmenni a vér–agy-gáton, ami felhalmozódást eredményez az agyszövetben. Ez jelentős viselkedésváltozásokhoz és morfológiai rendellenességekhez vezethet. Az expozíciónak kitett halak nagyobb súlycsökkenést mutattak, és agyuk víztartalma kisebb volt, mint a kontrollgyedek esetében (Kashiwada 2006).

A polisztirol-alapú mikroműanyagok képesek a fehérjék felületére kötődni (Walkey–Chan 2012). Ez további biológiai hatásokat eredményezhet. Murali és munkatársai tanulmányukban 45–70 nm közötti méretű, polisztirol-alapú mikroműanyag-részecskék hatását vizsgálták különböző idegsejteken (Murali *et al.* 2015). A vizsgálat során a szennyeződések megzavarták a sejtek metabolikus aktivitását. Egy másik tanulmány az emberi adenokarcinómás gyomorsejtekben történő felvétel kinetikáját vizsgálta. Megállapításra került, hogy a polisztirol-alapú, 44 nm méretű mikroműanyag gyorsan és nagy mennyiségben halmozódik fel a citoszolban (Forte *et al.* 2016). Az XPS-ből származó mikroműanyag befolyásolja az emberi vérlemezkék fiziológiáját is (Oslakovic *et al.* 2012). A talajban megjelenve gátolja a mikroorganizmusok aktivitását (Awet *et al.* 2018). Patkányokon végzett vizsgálatok során megállapításra került, hogy polisztirol-eredetű mikroműanyagok megjelenése a tüdőben tüdőgyulladást indukálhat. A nagy mennyiségű expozíció baromfik esetében rontja a vér vasszállító képességét, és morfológiai elváltozásokat okozhat a bélbolyhokban, ami hatással lehet a tápanyagok felszívódására (Brown *et al.* 2001).

Egy 2020-ban közzétett tanulmányban a kutatók megállapították, hogy 500 µg/ml koncentrációig a polisztirol-részecskék nem gyakorolnak toxikus hatást a humán sejtekre. A 10–100 µm átmérőjű XPS-részecskék nem okoznak szignifikáns sejtoxicitást. Ezzel szemben a kisebb méretű, 460 nm és 1 µm közötti átmérőjű



1. ábra | Különböző forrásokból származó, XPS-ből kioldódó kémiai anyagok elsődleges és másodlagos expozíciói

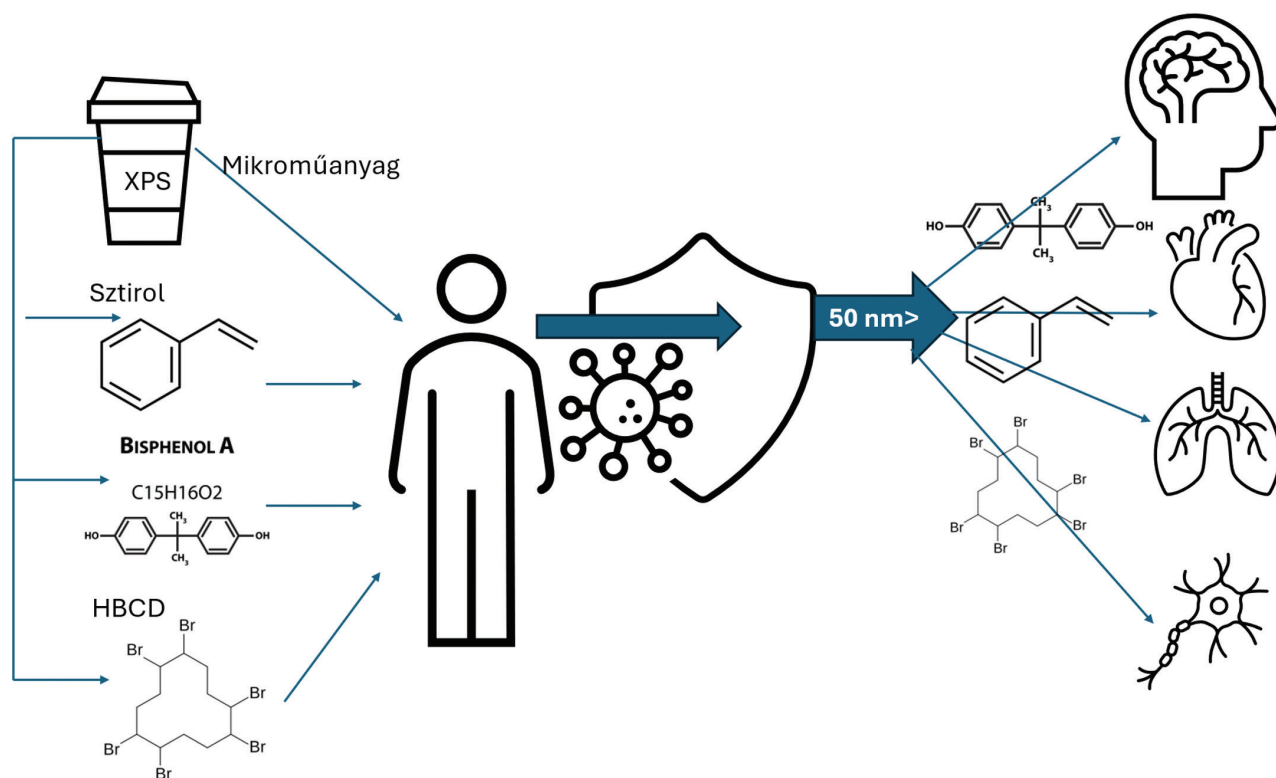
részecskék már kimutatható hatást gyakorolnak a vörösvértestekre (Hwang et al. 2020). A sztirol az Egészségügyi Világszervezet Nemzetközi Rákkutató Ügynöksége (IARC) a karcinogén anyagok közé sorolja (IARC 2002).

Az XPS-ből biszfenol-A (BPA) oldódik ki leggyakrabban, ami számottevő egészségügyi kockázatot jelent. A BPA két fenolcsoportot tartalmazó szerves vegyület; a szervezetben anyagcserezavarokat okoz, az endokrin rendszer zavarát és az ösztrogén-egyensúly felborulását (Li et al. 2010). Növeli a rák kialakulásának kockázatát (Ong-Samsudin-Soto-Valdez 2022). Az Amerikai Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (US EPA) egy átlagos ember becsült napi megengedhető BPA-terhelését 50 µg/testtömeg kg mennyiségben határozta meg (AMS USDA 2010). Az Európai Élelmiszer-biztonsági Hatóság (EFSA) a BPA napi tolerálható mennyiségét 4 µg/testtömeg kg mennyiségben állapította meg (EFSA 2015). A korlátozó intézkedéseknek köszönhetően az élelmiszeripari céllal készült termékekben a felhasznált BPA mennyisége az európai és amerikai gyártóknál folyamatosan csökken. A délkelet-ázsiai országok esetében azonban nincs hivatalos állásfoglalás, amely szabályozná a felhasznált mennyiséget (Zaw et al. 2023). Ez felveti a kérdést, hogy a távol-keleti országokból importált termékeknél az esetleges BPA-kioldódás mértéke megfelel-e az európai szabályozásnak.

A környezeti terhelést fokozza, hogy a XPS alapvetően éghető anyag, és tűzvédelmi céllal a gyártók égéskésleltetők alkalmazására kötelezettek. Ezek mint adalék anya-

gok az elkészült termék alkotójává válnak. A korábbi években hexabrom-ciklododekánt (HBCD) alkalmaztak erre a célra, de az Európai Unióban 2013-tól korlátozták a használatát a REACH rendelet módosításával (EP 1907/2006/EK rendelet). A korlátozás előtt gyártott XPS azonban a környezetünkben maradt, és folyamatos expozíciót okoz. A HBCD-t 2013. május 9-én a tartós szerves szennyező anyagokról szóló Stockholmi Egyezmény a tiltott felhasználású anyagok közé sorolta (POPRC8.3, 2013). Ennek egyik elsődleges oka, hogy rendkívül intenzív a környezeti elterjedése, és nagyfokú a szennyezése (Law et al. 2006). Jelenlétét még az Északi-sarkon is kimutatták (de Wit-Herzke-Vorkamp 2010). Növényi szövetekben szintén detektálták (Hunziker et al. 2004). Aggasztó, hogy a szervezetben megjelenő mennyisége folyamatosan növekszik a táplálékláncban (Li et al. 2011). Ez a tény az emberi egészségre nézve a HBCD többszörös expozícióját hordozza magában. Az XPS-alapú műanyagokból kioldódó vegyi anyagok emberre gyakorolt hatását és a biológiai rendszerekhez vezető útját a 2. ábra szemlélteti.

Az XPS mint élelmiszer-csomagolóanyag alternatívájaként manapság már több lehetőség áll rendelkezésre, és ezek többsége biztonságosabbnak mondható. A PLA (Polylactic Acid) természetes eredetű, komposztálható alapanyag, amelyet növényi cukrokból állítanak elő, természetes módon lebomlik, és nem bocsát ki toxikus anyagokat. Alapanyaga lehet például a kukoricakeményítő, a maniókahajtás, a cukornád vagy a cukorrépa (Mura-riu-Dubois 2016). Napjainkban jellemzően ipari kukori-



2. ábra | A kioldódó kémiai anyagok egészségügyi hatásai

cából készül, ugyanakkor folynak kutatások olyan technológiák fejlesztésére is, amelyekben szén-dioxidot vagy metánt hasznosítanak kiindulási anyagként (Trivedi et al. 2023). Egy másik alternatíva lehetne a rizs vagy cukornádrost (bagasse) növényi eredetű rostanyag, amelyet hő és nyomás segítségével formáznak csomagolóanyaggá. Komposztálható, biológiailag lebomló, és kiválóan alkalmas meleg, zsíros vagy nedves ételek csomagolására is, mivel jó hő- és nedvességálló tulajdonságokkal rendelkezik. Környezetbarát megoldást kínál az egyszer használatos műanyagok kiváltására, miközben stabil szerkezete és természetes megjelenése szintén előnyös a tudatos fogyasztók szempontjából (Tibalia et al. 2023). Az alternatív termékek esetében érdemes hangsúlyozni a versenyképes árat, mivel az jellemzően magasabb az XPS alapanyagú termékek árához képest.

Következtetések

Az extrudált polisztirol alapú csomagolóanyagok élelmiszer-biztonsági és környezeti kockázati tényezője első sorban a mikroműanyag-részecskék által okozott kémiai expozíció és a gyártás során egyéb okokból felhasznált adalék anyagok kioldódása. A sztírol és a polisztirol gyártása során felhasznált kemikáliák megjelenése a biológiai rendszerekben aggasztó. A környezetben körülveszik az embert, nem bomlanak le természetes, biológiai úton. Egyes vegyületek képesek átlépni a vér-agy-gátat, majd súlyos elváltozásokat okozhatnak. A gyártó országok eltérő szabályozása miatt a globális kereskedelem révén bárhol megjelenhetnek az élelmiszerláncban. Az ember a tápláléklánc csúcsán elhelyezkedve többszörös expozíciónak van kitéve a környezetéből és az élelmiszerekből. A környezeti hatás folyamatosan növekszik, mivel a polisztirol könnyen szétterjed a levegő és a víz útján, megjelenik a teljes élővilágban, a Föld minden pontján. A különböző kutatásoknak köszönhetően az utóbbi években már megkezdődött a gyártás során alkalmazott adalék anyagok és segédanyagok korlátozása, de a több évtized alatt gyártott XPS továbbra is körülveszi az embert, folyamatosan hatást gyakorol a szervezetre, a növény- és az állatvilágra.

A tanulmányban több, az XPS-hez kapcsolódó veszély leírásra került. A legnagyobb kockázatot önmagából fakadóan hordozza az XPS. A degradáció révén a szervezetbe jutva a monomer vagy a gyártás során alkalmazott adalék anyagok kioldódása elsődleges egészségkárosító hatású. Másodlagos és többszörös expozíció akkor alakul ki, amikor a környezetszennyezés következtében a fentiek megjelennek az élővilágban, majd ezáltal ismét eljutnak az emberhez. Egységes, világszintű szabályozás hiányában a globális kereskedelem számottevő kockázati tényezőként van jelen.

A tanulmány eredményeit összefoglalva a fogyasztók számára javasolt az XPS-alapú élelmiszer-csomagolóanyagokkal történő kontamináció csökkentése, illetve az élelmiszer-forgalmazók számára az élelmiszer fajtájának,

jellegének (hőmérséklet, zsírtartalom stb.) megfelelő típusú és megfelelő tanúsítással rendelkező csomagolóanyag vagy alternatív megoldások választása az elsődleges és másodlagos, egészség- és környezetkárosító hatások csökkentése érdekében.

Irodalomjegyzék

- A Bizottság 10/2011/EK rendelete (2011. január 14.) az élelmiszerekkel rendeltetészerűen érintkezésbe kerülő műanyagokról és műanyag tárgyakról. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=celex%3A32011R0010> [Letöltve: 2025. 04. 05.]
- Ajaj, A., J'Barí, S., Ononogbo, A., Buonocore, F., Bear, J. C., Mayes, A. G. & Morgan, H. (2021) An Insight into the Growing Concerns of Styrene Monomer and Poly(Styrene) Fragment Migration into Food and Drink Simulants from Poly(Styrene) Packaging. *Foods*, Vol. 10. No. 5, 1136. <https://doi.org/10.3390/foods10051136>
- AMS USDA (2010) Numbers: CAS Bisphenol A. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/BisphenolATR07072017.pdf>
- Awet, T.T., Kohl, Y., Meier, F. S. Straskraba, A.-L. Grün, T. Ruf, C. Jost, R. Drexel, E. Tunc & C. Emmerling (2018) Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. *Environmental Sciences Europe* 30, 11. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0140-6>
- Bonnard, D. (2016) La sensibilité auditive à l'harmonie, en présence ou en l'absence de déficit cochléaire. Doctoral dissertation. Université de Bordeaux.
- Borriello, L., Scivico, M., Cacciola, N. A., Esposito, F., Severino, L. & Cirillo, T. (2023) Microplastics, a global issue: Human exposure through environmental and dietary sources. *Foods*, Vol. 12. No. 18, 3396. <https://doi.org/10.3390/foods12183396>
- Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V. & Donaldson, K. (2001) Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: A role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 175. No. 3. pp. 191–199. <https://doi.org/10.1006/taap.2001.9240>
- Da Costa, J. P., Santos, P. S., Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. (2016) (Nano)plastics in the environment – Sources, fates and effects. *Science of the Total Environment*, Vol. 566. pp. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.041>
- EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF) (2015) Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, Vol. 13. No. 1, 3978. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3978>
- Emanuel, N. N. M. & Buchachenko, A. L. (1987) Chemical physics of polymer degradation and stabilization. VNU Science Press, Utrecht.
- Európai Parlament és a Tanács 1907/2006/EK rendelete (2006. december 18.) a vegyi anyagok regisztrálásáról, értékeléséről, engedélyezéséről és korlátozásáról (REACH). <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:136:0003:0280:hu:PDF>
- Forte, M., Iachetta, G., Tussellino, M., Carotenuto, R., Prisco, M., De Falco, M. ... & Valiante, S. (2016) Polystyrene nanoparticles internalization in human gastric adenocarcinoma cells. *Toxicology in Vitro*, Vol. 31. pp. 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2015.11.006>
- Groh, K. J., Backhaus, T., Carney-Almroth, B., Geueke, B., Inostroza, P. A., Lennquist, A. ... & Muncke, J. (2019) Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of the Total Environment*, Vol. 651. pp. 3253–3268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015>
- Heo, S. J., Moon, N. & Kim, J. H. (2024) A systematic review and quality assessment of estimated daily intake of microplastics through

- food. Online publication. Reviews on Environmental Health. <https://doi.org/10.1515/reveh-2024-0111>
- Hernandez, L. M., Yousefi, N. & Tufenkji, N. (2017) Are there nano-plastics in your personal care products? *Environmental Science & Technology Letters*, Vol. 4. No. 7. pp. 280–285. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00187>
- Hunziker, R. W., Friederich, U., MacGregor, J. A., Desjardins, D., Ariano, J. & Gonsior, S. (2004) Fate and effect of hexabromocyclododecane in the environment. *Organohalogen Compounds*, Vol. 66. pp. 2300–2305.
- Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S. Y., Choi, J. & Hong, J. (2020) Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Scientific Reports*, Vol. 10. No. 1, 7391. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
- IARC (2002) Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazard to Humans. <https://monographs.iarc.who.int>
- IARC (2019) Styrene, Styrene-7,8-oxide, and Quinoline. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 12. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Styrene-Styrene-7-8-oxide-And-Quinoline-2019>
- Kang, H. J., Park, H. J., Kwon, O. K., Lee, W. S., Jeong, D. H., Ju, B. K. & Kwon, J. H. (2018) Occurrence of microplastics in municipal sewage treatment plants: A review. *Environmental Health and Toxicology*, Vol. 33. No. 3, e2018013. <https://doi.org/10.5620/eh.t.e2018013>
- Kashiwada, S. (2006) Distribution of nanoparticles in the see-through medaka (*Oryzias latipes*). *Environmental Health Perspectives*, Vol. 114. No. 11. pp. 1697–1702. <https://doi.org/10.1289/ehp.9209>
- Katsara, K., Kenanakis, G., Alissandrakis, E. & Papadakis, V. M. (2022) Honey quality and microplastic migration from food packaging: A potential threat for consumer health? *Microplastics*, Vol. 1. No. 3. pp. 406–427. <https://doi.org/10.3390/microplastics1030030>
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V. & Bruzard, S. (2020) Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, Vol. 24. Article No. 100489. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100489>
- Kontou, S., Dessipri, E. & Lampi, E. (2021) Determination of styrene monomer migrating in foodstuffs from polystyrene food contact articles using HS-SPME-GC-MS/MS: Results from the Greek market. *Food Additives & Contaminants: Part A*, Vol. 39. No. 2. pp. 415–427. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.2005830>
- Kwon, J. H., Kim, J. W., Pham, T. D., Tarafdar, A., Hong, S., Chun, S. H. ... & Jung, J. (2020) Microplastics in food: A review on analytical methods and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17. No. 18. Article No. 6710. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186710>
- Law, K., Palace, V. P., Halldorson, T., Danell, R., Wautier, K., Evans, B. ... & Tomy, G. T. (2006) Dietary accumulation of hexabromocyclododecane diastereoisomers in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). I: Bioaccumulation parameters and evidence of bioisomerization. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 25. No. 7. pp. 1757–1761.
- Li, D., Zhou, Z., Qing, D., He, Y., Wu, T., Miao, M. ... & Yuan, W. (2010) Occupational exposure to bisphenol-A (BPA) and the risk of self-reported male sexual dysfunction. *Human Reproduction*, Vol. 25. No. 2. pp. 519–527. <https://doi.org/10.1093/humrep/dep381>
- Li, T., Li, G., Li, J., Li, X., Li, M. & Li, Y. (2021) HS-SPME and GC-MS for the analysis of odorous constituents from heat-treated rubberwood and the chemical change of heat-treated rubberwood by XPS analysis. *Wood Science and Technology*, Vol. 55. pp. 361–378. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01253-7>
- Li, Y., Zhou, Q., Wang, Y. & Xie, X. (2011) Fate of tetrabromobisphenol A and hexabromocyclododecane brominated flame retardants in soil and uptake by plants. *Chemosphere*, Vol. 82. No. 2. pp. 204–209.
- Liu, S., Huang, J., Zhang, W., Shi, L., Yi, K., Zhang, C. ... & Li, S. (2022) Investigation of the adsorption behavior of Pb (II) onto natural-aged microplastics as affected by salt ions. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 431. Article No. 128643. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128643>
- Liu, Z. & Yang, L. (2023) Control strategies for microplastic pollution in groundwater. *Environmental Pollution*, Vol. 335. Article No. 122323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122323>
- Murali, K., Li, Y., Demeter, K., Környei, Z. & Madarász, E. (2015) Uptake and bio-reactivity of polystyrene nanoparticles is affected by surface modifications, ageing and LPS adsorption: In vitro studies on neural tissue cells. *Nanoscale*, Vol. 7. No. 9. pp. 4199–4210. <https://doi.org/10.1039/C4NR06849A>
- Murariu, M. & Dubois, P. (2016) PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews*, Vol. 107. pp. 17–46. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>
- Ong, H. T., Samsudin, H. & Soto-Valdez, H. (2022) Migration of endocrine-disrupting chemicals into food from plastic packaging materials: An overview of chemical risk assessment, techniques to monitor migration, and international regulations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Vol. 62. No. 4. pp. 957–979. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1830747>
- Oslakovic, C., Cedervall, T., Linse, S. & Dahlbäck, B. (2012) Polystyrene nanoparticles affecting blood coagulation. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, Vol. 8. No. 6. pp. 981–986. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2011.12.001>
- Pathan, S. I., Arfaio, P., Bardelli, T., Ceccherini, M. T., Nannipieri, P. & Pietramellara, G. (2020) Soil pollution from micro- and nano-plastic debris: A hidden and unknown biohazard. *Sustainability*, Vol. 12. No. 18, 7255. <https://doi.org/10.3390/su12187255>
- Peñalver, R., Pérez-Álvarez, M. D., Campillo, N., Arroyo-Manzanares, N. & Viñas, P. (2025) Static headspace-gas chromatography with mass spectrometry for the assessment of the bioaccumulation of volatile organic compounds associated with microplastics in animal tissues. *Analytica Chimica Acta*, Vol. 1333. Article No. 343412. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343412>
- PORC – Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. <https://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/ReportsandDecisions/tabid/3309/Default.aspx> [Letöltve: 2025. 04. 05.]
- Repak (2019) State of the art working catalogue/database on the current solutions to recycle, reuse and repurpose. Work Package 5, Action 5.1. OceanWise. <https://www.oceanwise-project.eu>
- Revel, M., Châtel, A. & Mouneyrac, C. (2018) Micro(nano)plastics: A threat to human health? Current Opinion in Environmental Science & Health, Vol. 1. pp. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>
- Rist, S., Carney Almroth, B., Hartmann, N. B. & Karlsson, T. M. (2018) A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Science of the Total Environment*, Vol. 626. pp. 720–726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.092>
- Thompson, J. C., Quigley, J. M., Halfpenny, N. J. A., Scott, D. A. & Hawkins, N. S. (2016) Importance and methods of searching for e-publications ahead of print in systematic reviews. *BMJ Evidence-Based Medicine*, Vol. 21. No. 2. pp. 55–59. <https://doi.org/10.1136/ebmed-2015-110374>
- Tibalia, E. M. S. E., Wintoko, J. & Purnomo, C. W. (2023) Biodegradable Food Container from Rice Straw and Sugarcane Bagasse with Orange Peel Addition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1275, No. 1. Article No. 012012. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1275/1/012012>
- Trivedi, A. K., Gupta, M. K. & Singh, H. (2023) PLA-based biocomposites for sustainable products: A review. *Advanced Industrial and*

- Engineering Polymer Research, Vol. 6. No. 4. pp. 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.02.002>
- Turner, A. (2021) Polystyrene foam as a source and sink of chemicals in the marine environment: An XRF study. *Chemosphere*, Vol. 263. Article No. 128087. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128087>
- Udovicki, B., Andjelkovic, M., Cirkovic-Velickovic, T. & Rajkovic, A. (2022) Microplastics in food: Scoping review on health effects, occurrence, and human exposure. *International Journal of Food Contamination*, Vol. 9. Article No. 7. <https://doi.org/10.1186/s40550-022-00093-6>
- Umek, P., Huskić, M., Škapin, A. S., Florjančič, U., Zupančič, B., Emri, I. & Arčon, D. (2009) Structural and mechanical properties of polystyrene nanocomposites with 1D titanate nanostructures prepared by an extrusion process. *Polymer Composites*, Vol. 30. No. 9. pp. 1318–1325. <https://doi.org/10.1002/pc.20697>
- Walkey, C. D. & Chan, W. C. (2012) Understanding and controlling the interaction of nanomaterials with proteins in a physiological environment. *Chemical Society Reviews*, Vol. 41. No. 7. pp. 2780–2799. <https://doi.org/10.1039/C1CS15233E>
- Wit, C. A. de, Herzke, D. & Vorkamp, K. (2010) Brominated flame retardants in the Arctic environment – Trends and new candidates. *Science of the Total Environment*, Vol. 408. No. 15. pp. 2885–2918.
- Zaw, M. M., Poorahong, S., Kanatharana, P., Thavarungkul, P. & Thammakhet-Buranachai, C. (2023) Waste polystyrene foam-derived sorbent for determining bisphenol-A from canned beverages. *Food Chemistry*, Vol. 405. Article No. 134834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134834>
- Zhang, X., Su, H., Gao, P., Li, B., Feng, L., Liu, Y. ... & Zhang, L. (2022) Effects and mechanisms of aged polystyrene microplastics on the photodegradation of sulfamethoxazole in water under simulated sunlight. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 433. Article No. 128813. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128813>
- Zhou, P., Wang, L., Gao, J., Jiang, Y., Adeel, M. & Hou, D. (2023) Nanoplastic–plant interaction and implications for soil health. *Soil Use and Management*, Vol. 39. No. 1. pp. 13–42. <https://doi.org/10.1111/sum.12868>