

A kémiai visszaforgatás oldhatja meg a műanyag hulladék újrahasznosítását?

A műanyagipar évek óta törekszik a hulladékok hasznosítására, de az ideális elképzelést, hogy a használt műanyagból ismét feldolgozható műanyag legyen, csak a hulladékok egy töredékével lehet megvalósítani. Ezt a gondot talán meg lehet majd oldani az oldószeres technológiákkal vagy a hulladék hőkezelésével. Mindkét eljárás alkalmazható vegyes összetételű, többretegű, sőt szennyezett hulladék hasznosítására. A kioldott anyagok vagy a hóbomlás termékeiből szerencsés esetben újra műanyagot vagy más hasznos vegyi anyagot lehet készíteni, de az sem ördögtől való, ha gépkocsik üzemanyagaként energiátartalmát nyerik vissza.

Tárgyszavak: műanyag hulladék; hulladékhasznosítás; fizikai eljárások; kémiai eljárások; oldószeres technológiák; hóbontás.

A műanyagból gyártott termékek alapanyagának ismételt felhasználása már hosszú idő óta foglalkoztatja a műanyaggyártókat, az elmúlt években közzétett képek pedig a folyókat, a tengereket és a korábban idillikus szárazföldi területeket elborító műanyag hulladékról a közvéleményt a műanyagok ellen fordították. Műanyagok nélkül ma már nehezen lehetne fenntartani jelenlegi életformánkat, de az ezekben lévő alapanyagok és energia visszanyerése a szakemberek szerint is fontos gazdasági és környezetkímélő érdek.

A gyárakban képződő műanyag hulladék visszaforgatása a termelésbe – ahol a hulladék összetétele homogén, és legtöbbször szennyezést sem tartalmaz – ma része a gyártásnak. Az igazi gondot a használat után hulladékká váló műanyag termékek, a rengeteg csomagolóanyag, a gépkocsikba vagy épületekbe épített műanyag elemek újrahasznosítása jelenti.

A szelektív hulladékgyűjtés bizonyos mértékben csökkentheti a hulladék felelőtlen szét-szórását a természetben. De egyrészt ilyen gyűjtőrendszerek csak a fejlettebb országban működnek, másrészt ezekben is különböző műanyagfajták és műanyag termékek keveréke jelenik meg, amelyek csak akkor hasznosíthatók, ha költséges eljárásokkal szétválogatják őket.

A műanyag hulladék hasznosítása a legtöbb esetben arra irányul, hogy a hulladék alappolimerjét visszanyerjék, és abból ismét műanyag terméket gyártsanak, amelynek minősége lehetőleg ne legyen gyengébb, mint az eredeti granulátumé volt, és ugyanolyan terméket lehessen belőle készíteni. Elfogadható a valamivel gyengébb minőségű visszaforgatható műanyag is, amelyből az eredetnél kevésbé igényes terméket készíthetnek.

A hulladék ilyen módon végzett hasznosítása azonban csak akkor alkalmazható ipari méretekben, ha a hulladékfeldolgozókat folyamatosan nagy mennyiségben tudják ellátni a begyűjtött és szétválogatott hulladékból elkülönített, azonos polimerből készített termékekkel. Ilyenek ma a PET [poli(etilén-tereftalát)] palackok vagy a háztartási vegyszerek és más lakossági termékek PE-HD-ből gyártott palackjai, amelyek polimertartalmát a hulladékfeldolgozó

üzemekben új műanyag termékek gyártására alkalmas granulátummá tudják feldolgozni. A kis mennyiségű hulladék feldolgozása ilyen formában nagyon költséges volna, a többféle műanyagból felépülő vagy töltő- és erősítőanyagot tartalmazó műanyagok hulladékából az eredeti polimert visszanyerni ugyancsak nagy kihívást jelent. Ezért ezeket néha elégetik, hogy energiataartalmukat hasznosítsák, gyakran azonban hulladéklerakókban helyezik el őket.

Nem új ötlet a műanyag hulladék kémiai lebontása olyan vegyi anyagokra, amelyekből akár ismét polimert vagy más hasznos terméket gyárthatnak. Úgy tűnik, hogy ez a megoldás azoknak is egyre vonzóbb, akik eddig úgy gondolták, hogy műanyag hulladékból ismét csak műanyagot kellene készíteni. Lehetséges, hogy a kémiai bontással járó újrahasznosítás a hulladékkezelés hierarchiájában a DEFRA sorrendjében előre léphet. (A DEFRA – Department for Environment Food and Rural Affairs – londoni székhelyű brit kormányzati intézmény). Az általuk felállított sorrend a következő:

1. A hulladékképződés elkerülése.
2. Az alapanyag ismételt felhasználása.
3. Az alapanyag visszaforgatása azonos vagy hasonló termék gyártásába.
4. A visszanyert alapanyag felhasználása gyengébb minőségű termékben.
5. Kémiai bontás.
6. A bomlástermékek felhasználása hasznos anyagok gyártására, végső esetben energia-tartalmának hasznosítása (pl. üzemanyagként).
7. Elégetés.
8. Elhelyezés hulladéklerakóban.

A műanyag hulladék hasznosításának alapvetően két módja van: a hulladék fizikai visszaforgatása és a kémiai bontással kapott anyagok hasznosítása.

A **fizikai visszaforgatás** kétféle módon végezhető, lépései:

mechanikus felaprítás → granulálás → feldolgozás

feloldás oldószerben → kicsapás → granulálás → feldolgozás

A **kémiai hasznosítás** lehetőségei:

depolimerizáció → monomer → polimerizálás → granulálás → feldolgozás

hőbontás → szénhidrogén-elegy vagy szintézisgáz → ezek kezelése → vegyi anyagok;

hőbontás → áram vagy hőenergia termelése (egyszeri energetikai felhasználás)

biodegradálás → komposztálás.

Fizikai visszaforgatás

A fizikai visszaforgatást többlépcsős előkezeléssel kezdik. Ebbe tartozik szükség szerint a válogatás, a felaprítás, a méret szerinti szitálás, a mágneses fémmentesítés, az optikai ellenőrzés. A száraz mechanikai műveletek mellett nedves mosást vagy szétválasztást is alkalmazhatnak, a vízhez vegyi anyagokat – mosószert, lúgot, sót (a sűrűség szerinti szétválasztás miatt) – adnak. Ebben a vizes közegben távolítják el a felületre tapadt szennyeződést, a ragasztót, a címkéket. Az ilyen mosás nem érinti a polimer eredeti összetételét, vegyi és szerkezeti tulajdonságait. A megtisztított polimert extruderben megömlesztik, ahol szűrőn halad keresztül, majd granulálják. A granulátumból a szokásos feldolgozó eljárásokkal ismét műanyag termékeket lehet gyártani.

Az oldószeres eljárást ritkábban alkalmazzák. Ebben a polimer polaritásától függően olyan oldószert alkalmaznak, amely a makromolekulák közötti összetartó erőket fellazítja, és azokat oldatba viszi. Az oldat alapos tisztítása után a molekulákat kicsapják, kiszűrik, a polimert megszáritják, majd granulálás után feldolgozzák. A polimer eredeti tulajdonságai itt sem változnak.

A *mechanikus visszaforgatás* eredménye a hulladék válogatásától, majd a polimerek elkülönítésétől függ. Minél kevésbé homogén az ömledék, annál gyengébb minőségű lesz a belőle készített granulátum.

A Saperatec GmbH (Bielefeld) műanyaggal rétegelt termékek komponenseit (italos kartondobozokat, műanyaggal bevont alumíniumot, gépkocsielemekeket) egy speciális vegyi anyagból álló oldattal választja szét. A siker itt is az előválogatás szakszerűségétől függ. Egy spanyol cég, a Cadell Deinking a nyomtatófestékek eltávolítására fejlesztett ki technológiát, amely a címkéket is leválasztja. A homogén ömledék érdekében kompatibilitást javító adalékot is adnak a műanyagokhoz, hogy a benne maradó idegen anyagokkal jobban összeférjen. Ezzel az eljárással kevert lakossági poliolefin hulladékból vagy intenzív szagú polisztirol hálótároló dobozokból gyártanak újra feldolgozható granulátumot.

A kiürült PET palackokból és PE-HD-ből készített csomagolószerekből ma már sok hulladékfeldolgozó gyárt ismét palackot vagy más élelmiszerek forgalmazására engedélyezett gyártmányokat, ami annak köszönhető, hogy ezek könnyen elkülöníthetők a lakossági hulladék-áramtól, és nagy mennyiségben állnak a hulladékfeldolgozók rendelkezésére.

A *műanyagok oldószeres visszanyerésére* az 1990-es években születtek szabadalmak, de ez a technológia eddig csak kevésbé terjedt el. Ennek több oka van. Beruházása és gyártási költségei is meglehetősen magasak, ennél sokkal olcsóbb a hulladék elégetése vagy exportálása a kevésbé fejlett országokba. A több anyagból összetett termékek anyagának hasznosítása és a hulladékban kisebb mennyiségben megjelenő drága műanyagok visszaszerzése ismét felhívta a figyelmet erre a lehetőségre.

A brüsszeli központú Solvay S.A. olaszországi gyárában (Ferrara) 2002 és 2018 között 10000 t/évre növelte *Vinyloop* elnevezésű eljárásának kapacitását, amellyel az építőiparból származó PVC és lágy PVC hulladékot tudja újra feldolgozhatóvá tenni. A németországi APK AG (Merseburg) a polietilént és a poliamidot tudja többrétegű fóliákból vagy italos kartondobozokból visszanyerni oldószeres eljárásával. Kapacitása jelenleg 10000 t/év.

A Fraunhofer intézetcsalád freisingi Eljárás-technikai és Csomagolási intézetében fejlesztették ki a *CreaSolv* eljárást, amelyben a CreaCycle GmbH (Grevenbrohl) szelektív oldószereivel tudják visszanyerni a csomagolási hulladékból a poliolefineket, a polisztirolt (PS), a PET-et; az elektromos berendezésekből a sztirolkopolimereket; az építési hulladékból a PS-habot. De ki tudják oldani a szemétből az olyan értékes műanyagokat is, mint a poliamidok (PA), a poli(butilén-tereftalát) (PBT). 2019-ben az Unilever Indonesien cég egy 1000 t/év kapacitású kísérleti üzemben vezette be a *CreaSolv* eljárás alkalmazását, amellyel a többrétegű csomagolóanyagokból vonják ki a PE-t. Egy kisebb kísérleti üzem Bajorország északkeleti részében (Neunburg vor Wald) található.

Az európai Kooperatív PolystyreneLoop a közelmúltban állított fel egy 3000 t/év kapacitású demonstrációs berendezést, amelyben az építőiparból származó polisztirolhabot kívánja hasznosítani. Ezek a habok egy ma már betiltott égésgátlót, hexabrom-ciklododekánt

(HBCD) tartalmazzák. A habból kivonják az égésgátlót, a habot pedig fizikai eljárással újra feldolgozzák.

A Procter&Gamble *PureCycle* eljárásával az elöregedett PP szőnyegekben nyerik vissza a polimert, de a technológia csomagolóanyagokhoz is alkalmazható. A kísérleti üzemben végzett próbákban jó minőségű, színtelen és szagtalan regranulátumokat tudtak gyártani. Ezért Ohio-ban egy 50000 t/év kapacitású üzemet terveznek, ahol ezt a technológiát fogják alkalmazni.

Kémiai hasznosítás

Depolimerizáció

Az műanyagok visszaforgatásának első kémiai eljárásai a polimerek depolimerizálásán alapultak. A polikondenzációval előállított polimerek – ilyen a PET, a PA, a PC, a poliuretán – speciális oldószerekben (alkohol, lúgok, savak, aminok) ugyanis monomerjeikre bomlanak. Ezekből megfelelő tisztítás után ismét polimert gyártanak, amelyekből a szokott módon ismét műanyag termékeket lehet gyártani. Ezeknek a *Solvolyse* eljárásoknak többféle változata van. Ezekben az eljárásokban tulajdonképpen az eredeti polimert nyerik vissza, a granulátumot ugyanazok az atomok alkotják, mint az eredeti polimert.

Az olaszországi Aquafil S.P.A (Arco) 2019-ben Arizonában (USA) erre a technológiára alapozva épített egy üzemet, ahol PA6-ot nyernek vissza kiselejtezett szőnyegekben.

Az olaszországi központú Demeto Konsortium (Róma) eljárásában mikrohullámokkal támogatott hidrolízissel bontják a PET-et alkotóelemeire, azaz etilén-glikolra és tereftálsavra. Eljárásukat Európában már 13 hulladékfeldolgozó alkalmazza.

A Rampf Eco Solutions GmbH (Pirmasens, Németország) PUR visszanyerésére kínál hasonló eljárást.

Az Ineos cég európai vállalata, az Ineos Styrolution Köln GmbH a német kormány által támogatott *Resolve* projekt keretében, Észak-Amerikában az Agilyx céggel közösen dolgozik a polisztirol depolimerizálásán és repolimerizálásán. Chicagóban egy olyan üzemet terveznek, amelyben naponta 100 tonna PS hulladékot lehet majd feldolgozni. A lényegében az Agilyx cégnél kidolgozott eljárásban élelmiszerrel vagy más szerves anyaggal szennyezett hulladékot is fel tudnak használni. Ezzel a technológiával visszanyert PS granulátumból a német tejipar már kapott kisebb mintákat, amelyekből kifogástalan minőségű joghurtos poharakat gyártottak. Németországban 2022-re tervezik egy ipari méretű hulladékfeldolgozó beindítását a PS hulladék hasznosítására.

Kémiai hasznosítás hőbontással

A polimerek hőbontásának többféle változata és elnevezése van (pirolízis, termokatalízis, hidrokatalízis, gázosítás). A hőmérséklet valamennyiben meghaladja a 300 °C hőmérsékletet.

A pirolízist és a termokatalitikus eljárást oxigénmentes atmoszférában, inert gázzal végzik; az utóbbiban katalizátort is alkalmaznak. A főképpen poliolefinekből álló hulladékból különböző szénhidrogének keverékét nyerik ki, amely nagyon hasonlít a kőolajból előállított

könnyűbenzinhez, és gépkocsik üzemanyagaként is felhasználható. Ilyen eljárással a dániai Quantafuel cég (Skive) technológiájával 2020-ban beindítandó üzemében évi 18 000 tonna műanyag hulladékból pirolízis olajat terveztek gyártani.

A hidrokatalitikus eljárást levegő vagy oxigén jelenlétében, 10–90 bar nyomással és 700–1600 °C hőmérsékleten végzik. A műanyag hulladék hőkezelésekor a reakcióelegybe hidrogént adagolnak. Az így képződő, szintézisgáznak nevezett termékben rövid lánchosszú, telített szénhidrogéneket vannak, amelyek egy része oxidálódik (főképpen szén-monoxiddá), és amelyből könnyen lehet metanolt gyártani, abból pedig a poliolefin gyártáshoz szükséges monomereket előállítani. Ez az eljárás csak akkor gazdaságos, ha az alkalmazó üzem gyártókapacitása legalább 100°000 tonna/év

A hőbontás termékeiből üzemanyag helyett műanyagot kellene gyártani

Ha a műanyag hulladékból pirolízissel visszanyert olajat krakkolóban tovább finomítják, abból ugyanolyan szénhidrogéneket tudnak előállítani, mint kőolajból. Számos műanyaggyártó próbálja ezt az utat követni, mert ebben az esetben megvalósul az anyagok körkörös felhasználása, ha viszont ezt az olajat üzemanyagként (energiatartalma hasznosításaként) elégetik, ez a körkörös felhasználás megszakad.

A Sabic Europe cég (Geelen, Hollandia) hollandiai partnerétől, a Plastic Energytől vásárol pirolízis olajat, amelyet tisztítás, hidrogénezés után hagyományos krakkolóban tovább finomít. Ebből gyártja *Trucircle* márkájú műanyagait. A „minősített polimerekből” néhány partnerük már kapott kisebb mintát feldolgozásra. A Sabic jelenlegi kísérleti és ipari méret közötti üzemét 2021-ben bővíteni szándékozik, és meg akarja kezdeni *Trucircle PP* és *Trucircle PE* márkájú műanyagainak kereskedelmi forgalmazását.

A BASF-nek hasonló tervei vannak. Korábban elutasította a pirolízis olaj alkalmazását, de a közelmúltban 20 millió EUR-t fektetett be a dániai Quantafuel cégbe, hogy együttműködve tovább fejlesszék annak műanyag hulladékból pirolízis olajat gyártó technológiáját és bővíték kapacitását. Az évente 20 000 t/év kapacitású üzemnek 2020-ban kellett volna felépülnie, de a koronavírus-járvány miatt ez az időpont eltolódott. A BASF a pirolízis olajból előállított polimerek gyártási technológiájának a *ChemCycling* nevet adta.

A Sabic és a BASF egyaránt úgy véli, hogy a pirolízis olajból gyártott műanyagoknak kijár a „zöld” jelző, mert általa fosszilis alapanyagokat takarítanak meg, és hulladékot hasznosítanak.

A Dow cég (Midland, Michigan, USA) szerződést kötött a hollandiai Fuenix hulladékfeldolgozó céggel, amely szerint az ellátja a Dow hollandiai Terneuzenben lévő gyárat műanyag hulladékból származó pirolízis olajjal. Az egyezmény szerint a Dow 2025-ben már 100°000 tonna hulladékból visszanyert műanyagot akar eladni Európában. Eddig 10°000 tonna pirolízis olajat kaptak a Fuenixtől, és ezt a terméket be akarják vezetni szokásos alapanyagaik közé. Úgy vélik, általa meg tudják valósítani a műanyagok felhasználására elképzelt körkörös technológiát.

A Dow egy finnországi papírgyártó céggel, az UPM-mel is szerződést kötött annak érdekében, hogy minél kevesebb fosszilis anyagból származó alapanyagot használjon. A papírgyár UPM Biofuels nevű leányvállalata ugyanis papíripari hulladékból gyárt *BioVerno* márkájú üzemanyagot, amely ugyancsak nagyon hasonlít a pirolízis olajhoz, és a fosszilis eredetű

könnyűolajjal jól keverhető. *A műanyaggyártáshoz a fosszilis olaj, a műanyagból vagy a fa-rostból származó olaj egyformán alkalmas.* A Dow az utóbbira alapozva a kartonpapír felületére vihető műanyag bevonatot készít ebből. Az elmúlt évben a tejipar számára 40 millió kartondobozt készítettek ezzel a technológiával, amivel 180°000 tonna fosszilis eredetű műanyagot takarítottak meg, és ezzel a dobozgyártás ökológiai lábnyomát ötödére csökkentették.

A finnországi Neste cég (Espoo) az ugyancsak finn hulladékfeldolgozó Ravago céggel közösen azt tervezi, hogy évente 200°000 tonna műanyag hulladékból gyártanak különféle célra felhasználható alapanyagokat, 2030-ig pedig ezt a kapacitást 1 millió tonna/évre növelik. Ha ezt megvalósítják, azzal 20–30%-kal fogják növelni az európai lakossági műanyag hulladék hasznosíthatóságát. Kémiai bontással feldolgozható lesz a sokszínű és szennyezett hulladékkeverék, amelyből műanyagot, vegyi anyagot tudnak készíteni, vagy üzemanyagként tudnak alkalmazni. (A Neste a megújuló forrásból készített gépkocsi- és repülőgép-üzemek vezető gyártója.)

A brazil Braskem cég a kiskereskedelmi polietilénzacskókból származó pirolízis-olajból próbál új műanyagokat előállítani.

A spanyolországi *RecepcPlas* projekt célkitűzése a tengereket szennyező műanyagok hasznosítása. Végső céljuk, hogy a hulladékból származó pirolízis-olajat a halászhajók üzemanyagaként hasznosítsák.

A Chemical Recycling Europe

A Chemical Recycling Europe (CRE) a műanyag hulladék kémiai eljárásokkal végzett hasznosítását támogató szakmai szövetség, amelyet 2019-ben alapítottak; központjának címe: Avenue de Cortenbergh 71, 1000 Bruxelles, Belgium. Célkitűzésük, hogy növeljék az újrahasznosított műanyag hulladék mennyiségét, és ennek érdekében elősegítsék azok kémiai eljárásokkal végzett felhasználását. Terveik között szerepel új technológiák fejlesztése, a közvélemény meggyőzése a kémiai eljárások hasznosságáról és az illetékes szervek megnyerése ezeknek az eljárásoknak a rendeletekkel való támogatására. Céljuk az, hogy a kémiai eljárások alkalmazásának elfogadásával bezárják azt a kört, amelynek révén megteremthető az anyagok körkörös felhasználása, azaz a körkörös gazdaság. A CRE a közelmúltban egy publikációt jelentetett meg céljairól és javaslatairól. A publikáció bárki számára hozzáférhető a szövetség honlapján. (www.chemicalrecyclingeurope.eu)

Milyenek a kilátások?

Egy németországi tanulmány szerint az országban évente 6,2 millió tonna műanyag hulladék képződik, ebből 1,8 millió tonnát műanyagként dolgoznak fel ismét. A maradék 4,4 millió hasznosítására a meglévő feldolgozókapacitás meglehetősen szerény, ezért nem várható, hogy a képződő hulladékmennyiség a közeljövőben csökkenni fog. De reménykedni lehet abban, hogy a poliolefinok visszaforgatása részben a fizikai módszerek, részben pedig az APK oldószeres *CreaSolv* technológiájának alkalmazása révén növekszik. Mivel a kémiai eljárásokra alapozott hulladékfeldolgozó üzemeket gyakran túl nagy kapacitásokkal tervezik, féltő, hogy egy-egy vonzáskörzetben visszariasztják az újabb vállalkozókat. Ezt talán a feldolgozandó hulladék részarányának növelésével lehetne ellensúlyozni.

A jövőben várható, hogy a különböző hulladékfeldolgozó technológiákat nem egymás mellett, hanem egymással kombinálva alkalmazzák majd. A fizikai visszaforgatás a könnyebben kezelhető hulladék hasznosítására szorítkozhat. A válogatás utáni maradékot kémiai eljárással kezelhetik, a vegyi anyagokból (ha lehet) újra műanyagot vagy más terméket gyártanak, de nem számít majd pazarlásnak, ha csak a hulladék energiáját értékesítik.

Összeállította: Pál Károlyné

Schlummer, M.; Fell, T.; Mäurer, A.; Altnau, G.: Die Rolle der Chemie beim Recycling = Kunststoffe, 2020. 6. sz. p. 51–54.

Reade, L.: Chemical recycling staying in the loop = Film & Sheet Extrusion, 2020. április, p. 37, 38, 40, 42, 43., www.filmandsheet.com

Major players in chemical recycling = Film & Sheet Extrusion, 2020. április, p. 40., www.filmandsheet.com

Generating fuel from marine waste = Film & Sheet Extrusion, 2020. április, p. 39. www.filmandsheet.com

Chemical Recycling Europe calls for faster recognition = CRE, Compounding World, 2020. június, p. 14. www.compoundingworld.com