

[6] C. M. Starks, C. L. Liotta, M. Halpern, Phase-Transfer Catalysis, Fundamentals, Applications, and Industrial Perspectives. Chapman & Hall, New York, 1994.  
 [7] S. Narayan, J. Muldoon, M. G. Finn, V. V. Fokin, H. C. Kolb, K. B. Sharpless, Angew. Chem. Int. Ed. (2005) 44, 3275–3279.  
 [8] WO 2003062171 (2003).  
 [9] Z. Rádai, N. Z. Kiss, G. Keglevich, Curr. Org. Chem. (2018) 22, 533–556.  
 [10] D. I. Nagy, A. Grün, S. Garadnay, I. Greiner, G. Keglevich, Molecules (2016) 21, e1046.  
 [11] D. I. Nagy, A. Grün, K. Lévy, S. Garadnay, I. Greiner, G. Keglevich, Synth. Commun. (2018) 48, 663–671.  
 [12] N. Z. Kiss, G. Keglevich, Pure Appl. Chem. (2019) 91, 59–65.  
 [13] R. Henyecz, A. Kiss, V. Mórocz, N. Z. Kiss, G. Keglevich, Synth. Commun. (2019) 49, 2642–2650.  
 [14] Milestones in Microwave Chemistry – SpringerBriefs in Molecular Science (ed.: G. Keglevich). Springer, Switzerland, 2016.  
 [15] G. Keglevich, Z. Mucsi, in: Microwave Chemistry (eds: G. Cravotto, D. Carnaroglio). De Gruyter, Berlin, 2017, 53–64.  
 [16] G. Keglevich, N. Z. Kiss, A. Grün, E. Bálint, T. Kovács, Synthesis (2017) 49, 3069–3083.  
 [17] N. Z. Kiss, R. Henyecz, G. Keglevich, Molecules (2020) 25, 719.  
 [18] B. Schäffner, F. Schäffner, S. P. Verevkin, A. Börner, Chem. Rev. (2010) 110, 4554–4581.

**ÖSSZEFOGLALÁS**

KEGLEVICH GYÖRGY: TRENDEK ÉS LEHETŐSÉGEK AZ IPARI SZERVES KÉMIA KÖRNYEZETBARÁTBABBÁ TÉTELÉRE

Komoly kihívást jelent a vegyiparon belül az alkalmazott szerves kémiai átalakítások környezetbarátabbá tétele. Egyre fontosabb kiindulási anyag az etanol, amit a cellulóz hidrolízisével nyert glükóz alkoholos erjesztésével kapnak. Ahol lehetséges (pl. a kaprolaktám, szalicilsav és *p*-aminofenol gyártása), atomhatékony átalakításokat alkalmaznak. A katalitikus átalakítások között fontos szerepet töltenek be a fázistranszfer katalitikus megvalósítások. Az alternatív oldószerként is alkalmazható ionfolyadékok számos esetben kiváló katalizátorok. A folyamatos megvalósítások – beleértve a mikrohullám által segített reakciókat – komoly áttörést hozhatnak.

Tátraaljai Dóra – Pukánszky Béla

■ BME FKAT Műanyag- és Gumiipari Laboratórium, TTK AKI Polimerfizikai Kutatócsoport | [tatraaljai.dora@ttk.mta.hu](mailto:tatraaljai.dora@ttk.mta.hu)

# A műanyagipar és a műanyag-felhasználás környezeti hatásainak csökkentése

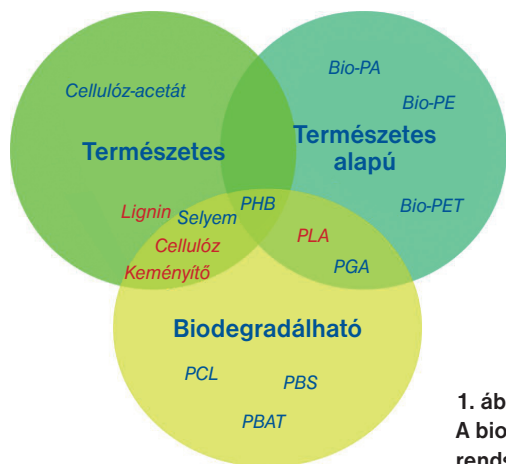
A világ műanyagtermelése az elmúlt 40 évben megnégyesződött [1], jelenleg az olajkitermelés 6%-át használják fel műanyagipari termékek gyártására [2, 3]. Ez nem véletlen, hiszen a műanyagok könnyen megmunkálható, olcsó, könnyű alapanyagok, amelyeket a csomagolóiparban, az építőiparban, az egészségügyben és még számos területen felhasználnak. Mindannyian ismerjük azonban a felelőtlen műanyag-felhasználás árnyoldalait is. Rengeteget olvashatunk, videókat láthatunk a tengeri állatok műanyagszennyezés okozta tömeges pusztulásáról, és ki ne bosszankodott volna az erdőben szétdobált hulladékok látványán. Kevesebbet hallhatunk azonban a műanyagok láthatatlan környezetterheléséről. A műanyagipar és a műanyagok felhasználása a teljes életciklus alatt 1,7 Gt CO<sub>2</sub>-ekvivalens-kibocsátást okozott 2015-ben, ami a világ szén-dioxid-kibocsátásának 3,8%-át tette ki. Egyes kutatások szerint, ha a felhasználás ilyen ütemben nő, akkor ez 2050-re elérheti a 15%-ot [4]. A kutatók nagy része egyetért azzal, hogy elsősorban a CO<sub>2</sub> okolható a globális felmelegedésért és a klímaváltozásért, ezért sürgető lenne a műanyagok szénlábnomának (carbon footprint) csökkentése, vagy legalábbis a jelenlegi szint megtartása.

A műanyagok szénlábnomája csökkenthető: biopolimerek alkalmazásával, gyártásuk során megújuló energiaforrások felhasználásával, újrahasznosítással és felhasználásuk csökkentésével.

## A szén-dioxid-kibocsátás csökkentési lehetőségei a műanyagiparban

### Biopolimerek

Jelenleg a világon évi 360 millió tonna műanyagot termelnek. Ennek pusztán 1%-át teszik ki a bioműanyagok, de előállításuk és felhasználásuk folyamatosan nő [5]. A biopolimerek általánosságban kisebb szénlábnomával rendelkeznek, mint a hagyományos fosszilis alapú műanyagok, mivel a polimer alapját képező növény a növekedése során szén-dioxidot köt meg [6]. A biopolimereket az **1. ábrán** látható diagram alapján osztályozhatjuk. A köztudatban a természetes, a természetes alapú és a biológiailag lebomló (biodegradálható) polimerek fogalma gyakran összerosódik. Fontos tisztázni, hogy e fogalmak egészen mást jelölnek, és az adott kategóriába tartozó polimereknek mások a tulajdonságai, bár ezek a halmazok, ahogy az **1. ábrán** is látható, átfednek egymással.



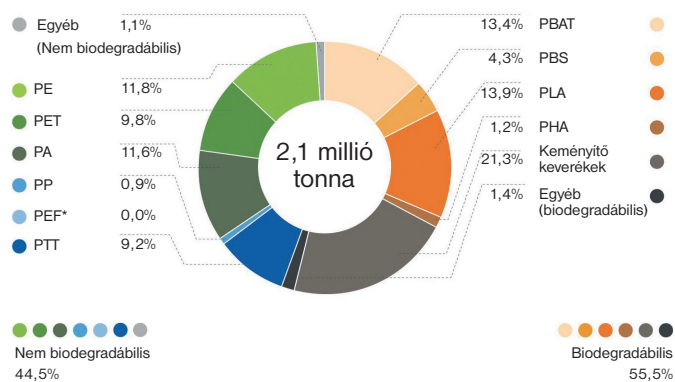
1. ábra. A biopolimerek rendszerezése

A természetes polimerek, a cellulóz, a lignin, a selyem formában található meg környezetünkben. Általában nehezen feldolgozhatók és kezelhetők, és nem helyettesíthetik a hagyományos műanyagokat. Felhasználhatók viszont töltőanyagként, mellyel a keverék szén-dioxid-mérlege jelentősen javítható. Ilyen keverékek például a fa-műanyag kompozitok (WPC), amelyek manapság már igen elterjedtek elsősorban kültéri burkolatként. Természetes alapú a biopoliamid (PA), -polietilén (PE), -polipropilén (PP): ezek természetes eredetű anyagokból előállított monomerek polimerizálásával készülnek. Szénlábnomuk közel zérus, hátrányuk azonban, hogy biológiai nem lebonthatók, mikroorganizmusok által előidézt bomlásra nem képesek. Ennek ellenére a biopolimerek piacának felét uralják [5]. A bio-PET (polietilén-tereftalát) előállítása egyelőre nem megoldott tisztán biomassza-alapon. A PET előállításához etilén-glikolra és tereftálsavra van szükség, amelyek közül csak az etilén-glikol előállítása megoldott cukornád alapanyagból, a tereftálsavat továbbra is kőolajból állítják elő.

A biodegradálható, de nem biológiai alapú polimerek csoportjába tartozik a polikaprolakton (PCL), a polibutilén-szukcinát (PBS) és a poli(butilénadipát-tereftalát) (PBAT). Ezek előnye, hogy biológiai lebonthatók, hátrányuk viszont, hogy nem csökkentik a műanyagipar szénlábnomát. Az 1. ábrán látható, hogy a polihidroxi-butirát (PHB) felel meg minden „elvárásnak”. A PHB a polihidroxi-alkanoátok (PHA) legjelentősebb képviselője. Bioszintetikus, biokompatibilis, biodegradálható, bomlástermékei nem mérgezők. Hátránya azonban, hogy bakteriális szintézissel körülményesen és nagy költséggel állítják elő. Tömeges gyártására nem számíthatunk, elsősorban implantátumok alapanyagaként és hatóanyag-hordozó mátrixként használják. A poliglikolsav (PGA) természetes alapú és biodegradálható, de vízben könnyen bomlik, ezért csak korlátozottan használható fel. Elterjedten használják tejsavval kopolimerizálva a politejsav (PLA) bomlásának felgyorsítására, elsősorban orvosi eszközök alapanyagaként [3].

A biopolimerek piaca 2019-ben a 2. ábra szerint alakult [5]. Összesen 2,1 millió tonna biopolimert gyártottak, amelynek nagyjából fele volt biodegradábilis, másik fele biológiai alapú.

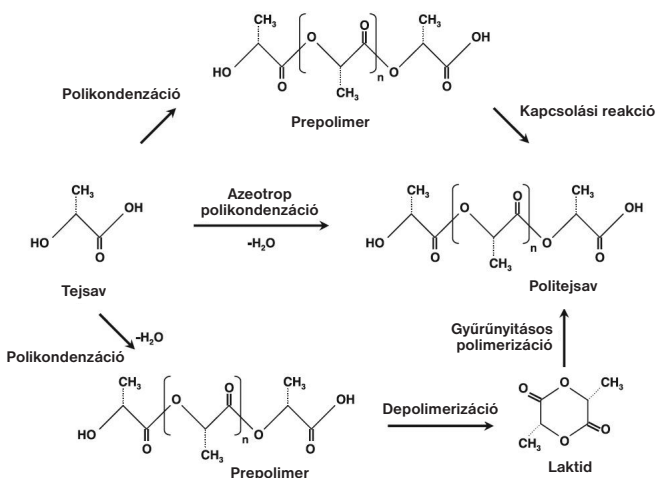
A leggyéretebb biopolimer a politejsav (PLA), amely biológiai alapú, szintetikus úton előállított polimer, de egyben biológiai le is bontható. Jó merevséggel és szilárdsággal rendelkezik, széles termékválasztékot tesz lehetővé, átlátszó termékek is készíthetők belőle. Hátránya, hogy nedvességérzékeny, tulajdonságai időfüggők, hőállósága és ütésállósága gyenge és ára még viszonylag magas: körülbelül háromszoros áron szerezhető be a kőolajalapú polimerekhez képest.



2. ábra. Az előállított biopolimerek részesedése [5]

PTT: politrimetilén-tereftalát; PEF: polietilén-furanoát

A PLA előállításakor általában valamilyen cukrot fermentálnak tejsavbaktériummal; ennek során D- és L-tejsav képződik. A fermentációhoz jelentős mennyiségű kénsvat és mészkövet használnak fel, melléktermékként pedig gipsz (CaSO<sub>4</sub>) keletkezik. Az egyszerű cukrok azonnal felhasználhatók, ezzel szemben az összetett cukrokat (keményítő, cellulóz) előbb bontani kell. Vonzó alternatíva lehet a lignocellulózok hasznosítása. Ezek jellemzően nagy mennyiségben hozzáférhető mezőgazdasági hulladékok (növények szára, levele), amelyek fermentálható szénhidrát tartalma hozzávetőlegesen 80%, ám sokkal körülményesebben használhatók fel. Először a lignintartalmat távolítják el erős savas vagy lúgos eljárással, majd enzimekkel tájékoztatják, és teszik a mikroorganizmusok számára hozzáférhetővé az alapanyagot. Ezután a 3. ábrán látható három módszer valamelyikével állítják elő a PLA-t [7].



3. ábra. A politejsav előállítási lehetőségei [7]

A tejsav tisztasága és a polimerizációs körülmények jelentősen befolyásolják az előállított PLA kémiai és fizikai tulajdonságait, kristályosságát és hőállóságát. A PLA megfelelően vízmentes környezetben újra feldolgozható, depolimerizáció után a monomerek újra felhasználhatók (kémiai újrahasznosítás), és ipari körülmények között a PLA komposztálható (60–80 °C, magas páratartalom, oxigén jelenléte) [2].

Életútelelmzések szerint az üvegházhatású gázok kibocsátása 40%-kal csökkenthető, ha a hagyományos fosszilis alapú műanyagokat (PE, PET) PLA-val helyettesítjük, ráadásul a PLA előállításához 25%-kal kevesebb nem megújuló energiára van szükség [3]. Meg kell azonban említeni, hogy az olyan tényezők, mint

az öntözéshez használt víz, a növényvédő szerek használata és a tejsav gyártása során keletkező melléktermékek környezetterhelését is figyelembe kell venni [3]. Másik megfontolandó tény, hogy a PLA bomlása szobahőmérsékleten, alacsony páratartalom mellett, megfelelő mikrobiális környezet hiányában nagyon lassú. Ez persze tartós fogyasztási cikkek esetében kedvező, de sokan azt hiszik, hogy a PLA meg fogja oldani a tengeri és a természetes környezet szennyezésének problémáját, holott ez így, sajnos, nem igaz. Ugyan fosszilis társainál valamivel rövidebb ideig szennyezi a környezetet, de a felelőtlenül eldobott biológiailag lebomló polimerből készült szemét is környezetterhelő. A hazai helyzetet tovább árnyalja, hogy jelenleg az országban nem gyűjtik szelektíven a lakossági komposztot, így a biodegradálható műanyagok is vagy a szelektív hulladékgyűjtőbe, vagy szeméttelre kerülnek, ahol anaerob körülmények között nagyon hosszú idő alatt bomlanak le. Ha bekerülnek az újrahasznosításra váró, fosszilis alapú műanyagok közé, azok feldolgozásakor technológiai problémákat és termékmínőség-romlást okozhatnak. Jelenleg az a legjobb eset, ha a biodegradálható műanyagot hulladékégetőbe szállítják, ahol a kémiai kötésekben tárolt energiát hő formájában visszanyerik, de olyan speciális alkalmazások is szóba jöhetnek, mint a kerti nyesedék, avar gyűjtésére szolgáló zsákok, amiket ipari komposztáló telepekre szállítanak.

**Megújuló energiaforrások alkalmazása a polimerek gyártása során**

Egyes számítások szerint a gyártás során felhasznált energia forrása jobban befolyásolja a polimer szénlábnymót, mint a gyártásához felhasznált alapanyag. Ha teljes egészében átállnánk biológiai nyersanyagokra, akkor a polimerek szénlábnymója 25%-kal csökkenne, míg ha megújuló energiát (szél, biogáz) használunk a polimerek előállításakor, akkor akár 50–70%-kal is csökkenteni lehetne a szén-dioxid-kibocsátást és a költségek is kevésbé növekednének [8]. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a növényi alapanyagok előállításához nagy földterületekre van szükség, ami csökkenti az élelmiszer-termelésre felhasználható területet. Technológiai szempontból is előnyös lehet, ha csak a felhasznált energiát cseréljük le megújulóra, hiszen ekkor az előállított polimerek minősége nem változik, ugyanazon gépeken dolgozhatók fel és nincs szükség újabb berendezésekre.

Természetesen a probléma megoldása nem ennyire egyszerű, hiszen a rendelkezésre álló megújuló energia mennyiségét nagyban befolyásolják a helyi adottságok, valamint amíg az energiatárolás kérdése nem megoldott, addig a legtöbb területen lehetetlen átállni tisztán megújuló energiára. Ezenkívül a biológiailag lebontható polimerek igen hasznosak lehetnek olyan felhasználások esetén, amikor a képződő hulladék nem hasznosítható újra az erős szennyeződés miatt, például eldobható pelenkák, egészségügyi termékek, kávékapszulák esetén. Ezeknél a hatalmas mennyiségben termelődő hulladékoknál a legjobb mód a megsemmisítésre a komposztálás lenne. Minden megoldás segít, ami csökkenti a szén-dioxid-kibocsátást, együtt kellene új műszaki megoldásokat és új anyagokat is bevezetni.

**Műanyagok újrahasznosítása – körkörös gazdaság**

A 20. század második felére a lineáris gazdasági séma vált általánossá, amikor is a természeti erőforrások kiaknázása, a termék előállítása és megvásárlása után a már szükségtelenné váló tárgyat eldobták, és az esetek többségében hulladékként kezelték. Napjainkban a népesség és a termelési kapacitások növekedése miatt ez a modell egyre tarthatatlanabb. Alternatívát a gazdaság



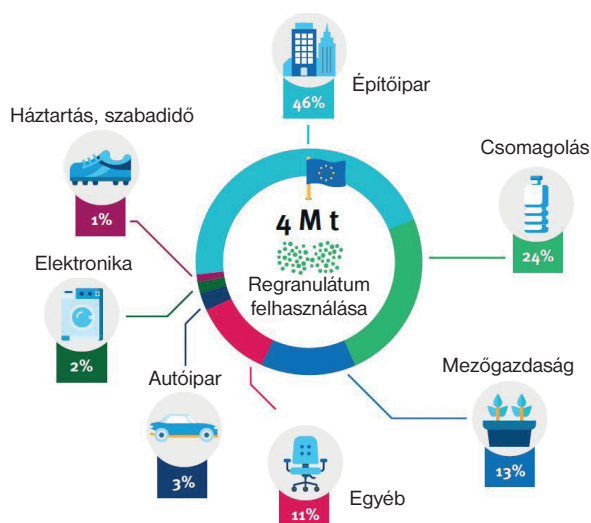
4. ábra. A körforgásos gazdaság elve [9]

körkörös működése jelenthet. Az Ellen MacArthur Alapítvány definíciója szerint a körkörös vagy körforgásos gazdaság olyan fenntartható modell, amelyben az élettartamuk végére jutott eszközöket, tárgyakat vagy alkalmassá teszik újbóli felhasználásra, vagy ha ez nem lehetséges, akkor másodlagos nyersanyagként újrafeldolgozzák és így hasznosítják [9, 10] (4. ábra). Ez a modell tehát az anyagok és az energia körfolyamatban tartására koncentráll. Az Európai Unió is nagy hangsúlyt fektet arra, hogy előmozdítsa ezeket a változásokat, a gazdasági szerkezet fokozatos átalakítását [11].

Az ideális körforgásos gazdaságban már a nyersanyagok kiválasztásakor gondolnak arra, hogy a belőlük készített termékeket újra lehessen hasznosítani, és a lehető legkisebb mértékben terheljék a környezetet. Ez az igény fokozott súllyal jelenik meg a termékek tervezésekor is. Egyes számítások szerint 80%-ban a tervezés során dől el, hogy mennyire lesz környezetterhelő az adott termék. A körkörös gazdasági modell általánossá válása esetén a világ szén-dioxid-kibocsátása közel 50%-kal csökkenne 2030-ra [10].

Az újrahasznosításnak három módja – fizikai, kémiai és energetikai – ismeretes. Egyesek idesorolják még az ipari szintű újrahasználatot is (amikor a visszaváltott betétdíjas palackot tisztítás után újratöltik), de ilyen termékekből egyre kevesebb van forgalomban a szigorú élelmiszerügyi szabályozások és a műanyag csomagolások nehézkes tisztítása miatt [12]. Ezzel szemben egyre

5. ábra. A műanyag regnanulátumok alkalmazási területei [11]



jobban terjed az a visszagyűjtési forma, amikor a PET-palackot laposra összenyomva visszaveszik, ám a betétdíj ez esetben a szelektív hulladékgyűjtés rendszerének kiegészítése.

2018-ban körülbelül 29 Mt lakossági hulladék keletkezett Európában, amelyből 9,4 Mt műanyag hulladékot válogattak ki fizikai újrahasznosításra. Ebből 5 Mt újrahasznosított alapanyag keletkezett, amelyből 4 Mt regranulátumot Európán belül értékesítettek és használtak fel az 5. ábrán látható alkalmazási területeken. Kémiaiilag csak 0,1 Mt műanyag hulladékot hasznosítottak újra, ezzel szemben a keletkezett hulladék csaknem felét energetikailag újrahasznosították, vagyis égetőben semmisítették meg energiavisszanyerés mellett. Nagyon fontos megjegyezni, hogy az újrahasznosítás aránya tízszer nagyobb volt azokon a területeken, ahol szelektíven gyűjtik a műanyag hulladékot (62%), mint azokon a helyeken, ahol válogatás nélküli elszállítás alkalmaznak (6%) [11]. Azokban az országokban, ahol a szemétkerakást nagyon megrágtították, 10% alatti a hulladéklerakás aránya, ellenben az ilyen fajta ösztönzést nem alkalmazó országokban 50% körül van (6. ábra) [13, 14].



6. ábra. Hulladékkezelés Európa különböző országaiban [14]

A fizikai újrahasznosítás során a műanyag hulladékot válogatják, tisztítják, aprítják és újból granulálják. A legnagyobb nehézséget a vegyes műanyag hulladék válogatása, tisztítása jelenti. Kivételt jelent a műanyag-feldolgozókból származó tiszta műanyag hulladék, amelynek minősége, összetétele jól ismert. Ezen anyagok értékesítése a legtöbb esetben nem okoz problémát, sokszor már az adott cég újrafeldolgozza, vagy jó áron értékesíti [13]. A vegyes műanyag hulladékot válogatás nélkül is fel lehet használni, ám ekkor jellemzően kisebb értékű másodnyersanyagot nyerünk, amelyből préseléssel vastag falú termékeket, például közlekedési táblák talpát, fekvőrendőrkötet, vandálbiztos padokat készíthetnek. Kiterjedt kutatások folynak a vegyes műanyag hulladék töltőanyagként való felhasználására a beton- és habarcsgyártásban. Pozitív hozadéka lehet, hogy a beton könnyebb lesz tőle, hátránya viszont, hogy rontja a mechanikai tulajdonságait és növeli az éghetőségét [15].

Értékesebb másodnyersanyag előállításához a vegyes műanyag hulladékot válogatni kell. Ez történhet a formája alapján (kézi válogatás esetén a PET-palackok kiválogatása), sűrűség, méret (nagy méretű termékek különválasztása), szín vagy kémiai szerkezet alapján. A válogatás országonként, régióként és cégenként is változik, általában többlépcsős, állomásos válogatók vannak. A három fő polimertípus, ami a vegyes műanyag hulladékban található, a PET, PE és a PP. A fejlettebb régiókban FT-NIR (Fourier-transzformációs közeli infravörös) spektroszkópot alkalmaznak első lépésben, majd manuálisan igyekeznek a gép által vétett hibás azonosításokat korrigálni. A tiszta PET hulladékot szín szerint válogatva bálázzák és szállítják el. Ez a legkevesebb és legkönnyebben elkülöníthető polimertípus. Vannak válogatók, ahol kizárólag jól képzett operátorok végzik a válogatást, a termék típusa alapján tudják, hogy milyen polimerből készült az adott tárgy. Ez inkább ott jellemző, ahol viszonylag olcsó az emberi munkaerő. Szintén elterjedt válogatási mód a hulladék aprítása és sűrűség szerinti, többlépcsős szétválogatása. Az első, forgó dobban végzett mosási lépésnél a nehezebb (fém-, kő-, üveg-) részecskéket választják le. Ezt követően még több mosási, úsztatási lépéssel igyekeznek a különböző sűrűségű szemcséket szétválasztani. A műanyagok közül a PE és a PP úszik a víz tetején, míg a többi részecske lesüllyed. Ez utóbbiak a vegyes műszaki műanyagfrakciót alkotják, amit már másodlagos nyersanyagként értékesíteni tudnak. A könnyű frakcióra jellemző (PE, PP), hogy szarítása során a nagy felületű részecskéket elsodorja a légáram (fóliamaradékok), ezeket regranulálják egy szűrővel felszerelt extruderen, és így értékesítik.

Szükség esetén különböző adalékanyagokkal, kompatibilizáló szerekkel javíthatók a regranulátumok tulajdonságai. Feldolgozás során a hő és nyírás hatására, majd utána az alkalmazás során is degradálódnak a polimerek. Ennek megakadályozására célszerű stabilizátorokat adalékolni a regranulálás során. Kompatibilizáló szerekkel a vegyes polimerekből álló polimerkeverékek mechanikai tulajdonságai javíthatók. Szükség lehet még színezőanyag adagolására, ami elfedi a regranulátum sokszor nem túl vonzó színét. Tipikus ilyen színező a korom, ami olcsó és jól fedi a korábbi színt. A kémiai újrahasznosítás még kevésbé elterjedt, de az ipar érdeklődése egyre nő iránta. Az eljárás során a polimert kis móltömegű komponensekre bontják le, melyeket vagy a műanyagiparban, vagy egyéb területeken használnak fel. Jelenleg a kemolízis a legelterjedtebb kémiai technika: polikondenzációs műanyagok bontására alkalmas, és monomereket szolgáltat. Elsősorban PET és PUR bontására használják. A másik kémiai módszer a pirolízis, amikor oxigénszegény környezetben, magas hőmérsékleten bontják le a hulladékot koromra, pirolízisolajra és gázokra. A pirolízis akkor lehet jó megoldás, ha a mechanikai újrahasznosítás nem jöhet szóba, például többretegű fóliáknál, kompozitok vagy keverékek esetében. A harmadik módszernél, a krakkolásnál katalitikusan, folyamatos eljárással bontják le a műanyagot különböző egyszerűbb szénhidrogénekre. A termékeloszlás a katalizátortól és a kezelési körülményektől függ. További lehetőség a nagy nyomáson és hőmérsékleten végzett hidrogénezés. Ekkor nő a H:C arány és csökken a keverék aromás szénhidrogéntartalma. Végül az elgázosítást lehet még megemlíteni mint kezelési módszert, amikor is magas hőmérsékleten szénhidrogénekké bontják le a polimereket. A KDV-eljárásnál alacsony nyomáson, megfelelő katalizátorok mellett a kezelt anyagból az oxigén CO<sub>2</sub> formájában szinte teljesen eltávolítható, míg a visszamaradó termék kerozinként vagy gázolajként használható fel [13].

A kémiai újrahasznosítás fő hátránya, hogy általában nem gazdaságos; a gazdaságosságot a kőolaj ára, a magas beruházási költségek és a viszonylag kis termelési kapacitások egyaránt befolyásolják. Egyes számítások szerint például a PET kemolízise 15 000 t/év kapacitástól lehetne nyereséges [16].

Mint láttuk, az EU fejlettebb tagállamaiban az energetikai újrahasznosítás, vagyis az energia-visszanyerés melletti égetés nagyon elterjedt eljárás, előnyben részesítik a lerakással szemben.

Alapvetően két technológiánál égetnek el műanyag hulladékot energiatermelési céllal. Az egyik a cementgyártás, a másik a kommunális hulladékégetés. Az égetés mellett esetenként szóba jöhetnek még fokozottan veszélyes anyagok kezelésére alkalmas egyéb technológiák is, például a termikus plazmákban történő hulladékkezelés. A tiszta műanyagok fűtőértéke nagyon magas, közel azonos a fűtőolajéval, ezért is alkalmas a cementgyárakban történő felhasználásra, ahol ~1500–2000 °C-ot kell előállítani. Magyarországon a négy cementgyár készséggel fogadja az elhasznált gumiabroncstól kezdve a vegyes lakossági műanyag hulladékig az összes, más módon már fel nem használható műanyag hulladékot [17]. A tüzelőanyagok egy légtérben égnak el a többi felhasznált alapanyaggal (mész, agyag), ezért a klinkerben, a cementgyártás köztitermékében oldhatatlan kőtest alkotnak az elégetett hulladék maradékával, azaz gyakorlatilag nincs mellékterméke az eljárásnak. Az extrém magas hőmérsékletnek és a modern füstgázszűrő berendezéseknek köszönhetően a cementgyárak károsanyag-kibocsátása minimális. A hagyományos hulladékégetőművek jellemzően 800–1100 °C körül üzemelnek. Vegyes háztartási hulladék égetésekor az égetési hatékonyság jelentősen romlik, hiszen magas víztartalmú hulladékokat is elégetnek ahelyett, hogy azok komposztálódna vagy biogázüzembe kerüljenek [18]. Az adott hőmérséklet-tartományban a kommunális hulladékkal bekerülő műanyag hulladékok nem bomlanak le teljesen, másrészt fokozottan veszélyes, esetenként karcinogén bomlástermékek (dioxinok, furánok, polikondenzált szerves anyagok) is képződhetnek. Kommunális hulladékok égetésekor ezért különös figyelmet kell fordítani a káros melléktermékek képződésére, és meg kell akadályozni azok kijutását a környezetbe, a véggázok termikus, kémiai vagy katalitikus utókezelésével. Szerecsére, a hulladékégetők jelenleg csak nagyon szigorú, az Európai Unió által megszabott füstgáz-ellenőrzéssel, alacsony károsanyag-kibocsátás mellett üzemeltethetők. A hulladékégetőkben képződő hőt felhasználják; a Fővárosi Hulladékhasznosító Mű például 420 ezer tonna kommunális hulladék termikus hasznosítását teszi lehetővé, és ezzel 13 ezer lakás fűtéséhez szükséges gőzt és 45 ezer lakás éves villamosenergia-ellátásához szükséges energiamennyiséget állít elő [19].

Érdekes kérdés, hogy a klímaváltozás szempontjából mi lenne előnyösebb, ha lerakókba tesszük a hulladékot, amit nem tudunk újrahasznosítani, vagy ha elégetjük. Tekintve, hogy a világon még mindig hatalmas mennyiségben bányásszák és égetik a fekete- és barnakőszén, könnyű belátni, hogy valamivel kevesebb fosszilis, elsődleges nyersanyag elégetése mellett ugyanazt a végeredményt érjük el, ha modern, szűrőkkel ellátott, jó hatékonyságú hulladékégetőket építünk a lerakás helyett.

### A műanyag-felhasználás csökkentése

Napjainkban egyre népszerűbb nézet, hogy a műanyag-felhasználás akkor csökkenthető, ha alulról szerveződünk, vagyis a saját szokásainkat kell megváltoztatni, hiszen az ipar és a gazdaság érdekei általában ezzel ellentétesek. A „zero waste” mozgalom képviselői például egészen extrém mértékben csökkentik a hulladéktermelésüket, gyakorlatilag nem termelnek szemetet. Csomagolásmentes boltba járnak, otthon főznek, még a higiénias termékeket is maguknak készítik maradék textilanyagokból. Természetesen az ilyen szélsőséges életmódváltást igénylő lépések a társadalom nagy részétől nem várhatók el, az emberek nem szívesen mondanak le a kényelmükről.

Másik lehetőség, hogy törvényi szabályozással igyekezzünk rábírni az embereket a takarékos műanyag-felhasználásra, illetve

az ipart arra, hogy akár magasabb költségek árán is, de környezetbarát megoldásokat és termékeket vezessen be. Az Európai Unió a műanyag hulladék csökkentése, a körkörös gazdaság irányába való elmozdulás és a tengeri állatok védelmében direktívát adott ki 2019 júniusában. Ennek értelmében az egyszerű használatos műanyagok felhasználását csökkenteni, újrahasznosítási arányát pedig növelni kell [20]. Az Unióban a tengerparti hulladékszámítás alapján a tengeri elhagyott hulladék 80–85%-a műanyag, ebből az egyszerű használatos műanyag 50%-ot, a halászattal kapcsolatos tételek pedig 27%-ot tesznek ki. Ilyen egyszerű használatos termékek például az italos palackok, készleteltároló/felszolgáló dobozok, gyümölcsös dobozok, műanyag evőeszközök, szívószálak stb. Amennyiben lehetséges, az ilyen termékeket le kell cserélni nem műanyagra vagy többször felhasználható termékekre. Ha nincs jó alternatíva a helyettesítésre, ilyen lehet például az üdítőitalos palack, gondoskodni kell a hulladék megfelelő visszagyűjtéséről és nagy arányban történő újrahasznosításáról. Az újrahasznosítás előmozdításának jó eszköze lehet például a már említett palackvisszaváltási rendszer, vagy annak meghatározása, hogy hány százalék újrahasznosított műanyagot kell tartalmaznia az újonnan forgalomba kerülő palackoknak. ●●●

### IRODALOM

- [1] R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, *Sci. Adv.* (2017) 3(7), e1700782.
- [2] J. Payne, P. McKeown, M. D. Jones, *Polym. Degrad. Stab.* (2019) 165, 170.
- [3] Y. Zhu, C. Romain, C. K. Williams, *Nature* (2016) 540(7633), 354.
- [4] J. Zheng, S. Suh, *Nature Clim. Ch.* (2019) 9(5), 374.
- [5] *Bioplastics market data 2019*, Eur. Biopl. (2020).
- [6] G.-Q. Chen, M. K. Patel, *Chem. Rev.* (2012) 112(4), 2082.
- [7] B. Gupta, N. Revagade, J. Hilborn, *Prog. in Polym. Sci.* (2007) 32(4), 455.
- [8] I. D. Posen, P. Jaramillo, A. E. Landis, W. M. Griffin, *Env. Res. Lett.* (2017) 12(3), 034024.
- [9] EU-Parliament, *Circular economy: the importance of re-using products and materials*, 2015.
- [10] <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>, 2020.
- [11] *The circular economy for plastics*, A European Overview, Plastics Europe. 2019.
- [12] K. Hamad, M. Kaseem, F. Deri, *Polym. Degrad. Stab.* (2013) 98(12), 2801.
- [13] K. Ragaert, L. Delva, K. Van Geem, *Waste Man.* (2017) 69, 24.
- [14] *PlasticsEurope, Plastics-the Facts 2019*.
- [15] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, A. Alaskar, *Constr. Build. Mat.* (2020) 253.
- [16] N. George, T. Kurian, *Ind. & Eng. Chem. Res.* (2014) 53(37), 14185.
- [17] <https://www.lafarge.hu/fenntarthatosag/masodlagos-tuzeloanyag-felhasznalas>
- [18] <https://alteo.hu/eromuvek/megujulo-gaz/nagykorosi-biogaz-uzem>
- [19] <https://www.fkf.hu/fovarosi-hulladekhasznosito>
- [20] Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2019/904 irányelve az egyes műanyagtermékek környezetre gyakorolt hatásának csökkentéséről, 2019.

### ÖSSZEFOGLALÁS

#### TÁTRAALJAI DÓRA, PUKÁNSZKY BÉLA: A MŰANYAGIPAR ÉS A MŰANYAG-FELHASZNÁLÁS KÖRNYEZETI HATÁSAINAK CSÖKKENTÉSE

A műanyagipar és a műanyag-felhasználás jelenleg csak körülbelül 4%-ban járul hozzá a világ összes szén-dioxid-kibocsátásához, de ha a felhasználás a jelenlegi ütemben nő, akkor ez az arány sokkal nagyobb lehet a közeljövőben. Számos módszer van arra, hogy csökkentsük a műanyagok szénlábnymát, ilyen a biopolimerek bevezetése, a megújuló energiaforrások alkalmazása a gyártás során, az újrahasznosítás és a műanyag-felhasználás csökkentése. Sajnos, a jelenlegi kőolajár mellett ezek a megoldások még sokszor nem elég gazdaságosak ahhoz, hogy tért hódítsanak; egyelőre elengedhetetlen a szigorú törvényi szabályozás a környezetvédelem érdekében. Nagy szükség lenne az emberek szemléletmódjának megváltozására is, ösztönözni kellene a szelektív hulladékgyűjtést, és takarékosabban kellene bánnunk a rendelkezésünkre álló erőforrásokkal.