

## Komposztálható és az élő szervezetben lebomló politejsav alkalmazása

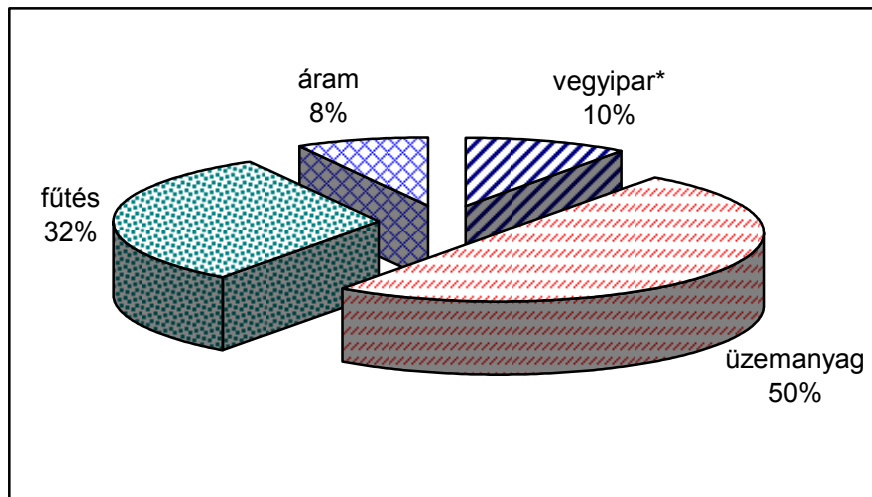
A politejsav (PLA) a bioműanyagok egyike (mert megújuló forrásból származik), egyúttal biodegradálható (mert komposztálható). Felhasználását elsősorban a csomagolóipar számára ajánlják, de újabb alkalmazási területeit is keresik. Ilyen lehet a biomassza gyűjtésére szolgáló és azzal együtt komposztálható PLA zsák, vagy a regeneratív orvostechika, amelynek az élő szervezetben előre meghatározott élettartamú polimerekre volna szüksége. Egy kutatócsoport *in vitro* és *in vivo* kísérletekben vizsgálta a PLA és származékainak degradációját.

*Tárgyszavak: bioműanyagok; biodegradálhatóság; ökohatékonyság; politejsav; csomagolóipar; orvostechika; komposztálás; in vitro; in vivo.*

A világ olaj-, gáz- és szénttartalmú végesegek, és már a közeljövőben megújuló energiaforrásokkal és nyersanyagokkal kell ezeknek legalább egy részét helyettesíteni. És amint a kőolaj nagyrésztét is elégetik, egy részéből pedig értékes kémiai alapanyagokat készítenek, a megújuló nyersanyagokat – a kukoricát, a gabonát, a cukrot – elsősorban élelmiszernek tekintik, de lehet belőle hőt, villamos energiát, üzemanyagot, vegyipari alapanyagokat, az utóbbiakból pedig műanyagokat gyártani. Hogy melyik a fontosabb, azt gyakran viták tárgya. Hasonló viták kísérik a hulladékkezelést, a műanyag hulladékát is. Anyagában újra feldolgozni? Részlegesen lebontani és vegyi alapanyagként hasznosítani? Elégetni és hőtartalmát visszanyerni? Szerkezetét úgy átalakítani, hogy a természetben vagy akár az élő szervezetben sok más szerves anyaghoz hasonlóan képes legyen akár elemeire is leépülni? Melyik lenne a kitűzendő cél? A viták hevében több olyan fogalom született – ilyen a „bio”, a „fenntartható”, a „környezetbarát”, az „energiahatékony”, az „ökohatékonny” – amelyeket akkor is használnak, amikor az nem indokolt. Érdekes ezeknek a fogalmaknak a jelentését tisztázni.

*Mit jelent pl. az „ökohatékonny”? A BASF ökohatékonysági elemzése vagy más életciklusvizsgálatok (LCA, life cycle assessment) segítségével meg lehet becsülni, hogy többféle alternatív termék közül a környezetre gyakorolt hatása és gazdaságossága alapján melyik az, amely a „legkisebb lábnyomot” hagyja a természetben. A közvélemény ilyenek tartja a biológiai eredetű nyersanyagokat és az ezekből készített bioműanyagokat. Ha azonban az egyes anyagok gyártásához szükséges szállítási utakat, a vízfelhasználást, a műtrágyaszükségletet, az erdők kivágását, a biomassza finomításához felhasznált energiát is számba vesszük, kiderülhet, hogy a bioműanyag ke-*

vésbé „ökohatékony”, mint a fosszilis alapanyagokból gyártott hasonló műanyag. Hogy mennyire csekély a jelentősége a biomasszából előállított műanyagoknak a fosszilis alapanyagok felhasználásának mérséklésére és az üvegházhatású gázok kibocsátására, azt az 1. ábra érzékelteti, amelyből kiderül, hogy a világon 2010-ben felhasznált 4028 millió tonna kőolaj 80–90%-át üzemanyagként, ill. fűtésre és hűtésre használták fel, és mindössze 10%-ából készítették vegyipari alapanyagokat, ezek kb. harmadából pedig műanyagokat.



1. ábra A világ 2010. évi 4018 millió tonnás kőolaj-felhasználásának megoszlása a különböző alkalmazási területek között  
 (\* a vegyipari alapanyagok kb. harmadából készítették műanyagokat)

Ha másfelől közelítjük meg a műanyagokat, kiderül, hogy ezekből felhasználásuk után nagy tömegű hulladék marad vissza, amely a biomassza részét képezi, és hasznosításra érdemes. Ez nemcsak a növényi alapanyagokból gyártott bioműanyagokra igaz, hanem a fosszilis eredetű műanyagokra is, feltéve, hogy biológiai úton lebonthatók. A közvélemény és néha egyes szakkikkek is bioműanyagoknak nevezik a természetes vagy közel természetes körülmények között degradálódó műanyagokat, pedig ezek lehetnek a petrokémiai technológia termékei is. A megújuló (növényi) forrásból származó bioműanyagokat tehát meg kell különböztetni a biodegradálható műanyagoktól, amelyek az *EN 13432* szabvány meghatározása értelmében komposztálás útján, megfelelő ipari berendezésben hasznosíthatók. A biodegradáció speciális formája egyes műanyagok felbomlása és felszívódása (vagy kiürülése) az élő szervezetből, amit az orvostechnika hasznosíthat.

### **Biodegradálható műanyagok hasznosítása komposztálással**

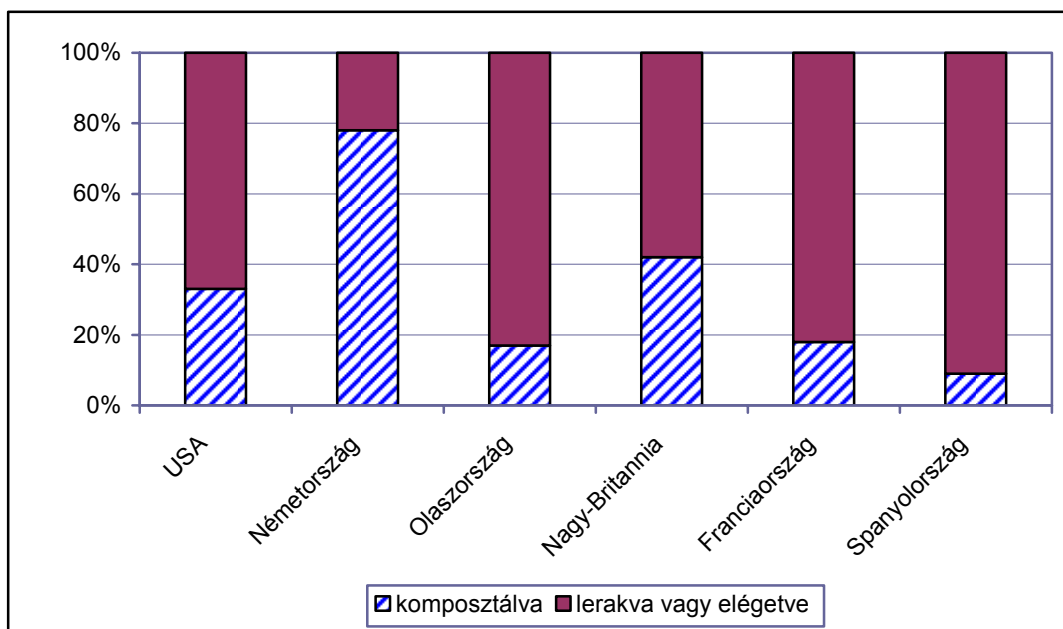
A *komposztálás* szerves anyagok aerob körülmények között végbemenő degradációja mikroorganizmusok közreműködésével. Komposztálásra alkalmas biomassza

nemcsak a háztartásokban keletkezik, hanem a nagy élelmiszerláncokban és mindennütt, ahol élelmiszert előállítanak, tárolnak vagy szállítanak.

A műanyag hulladék hasznosításának három alapvető lehetősége az eredeti anyag megfelelő előkészítés utáni újrafeldolgozása, a részleges lebontás után kapott bomlás-termékek nyersanyagként való felhasználása, ill. a hulladék elégetésekor kapott energia hasznosítása. Hogy melyik eljárás a leghasznosabb, az a hulladék tömegétől, minőségétől, heterogenitásától, logisztikájától függ. Az *ökohatékonyság* átfogó elemzésekor számos esetben az elégetés bizonyul a legjobb választásnak. A komposztálás tulajdonképpen a részleges lebontás és a nyersanyagként hasznosítás egyik formája, hasonló ahhoz, mint amikor az almahéjat vagy a rohadt paradicsomot komposztálják, amelynek komposztján újabb almafa vagy paradicsomnövény hozhat termést. A ma már forgalomban lévő, biodegradálható műanyagból készített zacskók és más csomagolóeszközök anyagát egyszerűen és higiénikusan lehet az ipari komposztálás technológiájával visszavezetni az anyagok körforgalmába.

### *A biohulladék hasznosítása a világban*

Németországban már bevált gyakorlat a komposztálható hulladék elkülönítése a hulladék többi részétől, és bár ebben élen jár a többi ország között, a lehetőségeket még nem merítette ki teljesen (2. ábra). A világ egészét tekintve, ezen a területen még óriási lehetőségek vannak, különösen a fejlődő országokban, de 2006-ban pl. Ausztráliában is még az évente képződő biohulladék 62%-át (14 M tonna) helyezték el lera-  
kókban.



2. ábra A teljes biohulladékból komposztált, ill. lerakott vagy elégetett mennyiség megoszlása a különböző országokban

A **BASF** a Német Együttműködési Társasággal (**GTZ, Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit**) közösen a thaiföldi Samutsonkramban 2010-ben indított egy projektet, amelyben széles körű információs kampány keretében biohulladék-gyűjtő zsákokat osztott szét a lakosság között. Thaiföldön eddig semmiféle infrastruktúra nem volt a szerves háztartási hulladék gyűjtésére és hasznosítására. A projekt befejeződése után a kampányba bevont háztartások több mint 90%-a nyilatkozott úgy, hogy szívesen venne részt a szervezett hulladékgyűjtésben.

1 kg biohulladékból a lerakókban 4000 g CO<sub>2</sub>-ekvivalensnek megfelelő mennyiségű metán szabadul fel; az ipari komposztálókból csupán 19 g. *A komposztálás tehát rendkívüli mértékben csökkenti az üvegházhatású gázok emisszióját.* Emellett a hulladékból képződő komposzt fontos növényi tápanyagokat tartalmaz, és a talajba keverve javítja annak az intenzív mezőgazdasági technológia miatt kilúgozott termőképességét. Az erősen erodált talajok is sokkal olcsóbban hozhatók helyre komposzttal, mint más talajjavító eljárásokkal. A komposzt ökológiai és gazdasági szempontból is hasznos termék.

### *Műanyag zacskók és hordtáskák szerepe*

A biodegradálható műanyagokból készített zacskók és hordtáskák különösen alkalmasak arra, hogy ezekben gyűjtsék tisztán és higiénikusan a komposztálható biohulladékot. Maguk a zacskók csekély tömegük miatt ugyan nem adnak számottevő tápanyagot, megkönnyítik azonban az egyéb hulladék összegyűjtését, és maguk is komposztává válnak. A **BASF** 2011-ben Bad Dürkheim körzetében 65 000 háztartásnak adott a cég *Ecovio* márkanevű biodegradálható műanyagából készített szemeteszsákcsoomagot a biohulladék gyűjtésére. 2010-ben a kanadai Kingstonban, 2011-ben az ausztráliai Dandenongban kisebb körben már bebizonyosodott, hogy ezek a zsákok tökéletesen lebomlanak az ipari komposztáló berendezésekben. A dürkheimi kísérlet ezeket az eredményeket kívánja egy valódi gyűjtőrendszer méreteinek körülményei között igazolni.

A biodegradálható gyűjtőzsákok alkalmazására másutt is vannak példák. A texasi Houstonban ilyenekben gyűjtik össze a lekaszált fűvet és más kerti hulladékot. A München melletti Straubingban ugyancsak széles körű kísérletben mérik fel a biodegradálható műanyag zsákok ilyen célú alkalmazhatóságát. Más német városok is érdeklődnek az eljárás iránt.

Az *Ecovio* poliészterkeverékből azonban nem kell közvetlenül hulladékgyűjtő zsákokat készíteni. A németországi Aldi üzletlánc a kevésbé ökohatékony polietilén- vagy papírzacskó helyett biodegradálható polimerből készített füles zacskóba csomagolja a megvásárolt árut. Ezt a zacskót a háziasszonyok többször is felhasználhatják hordtáskaként, és ha erre a célra már nem alkalmas, ebben gyűjthetik a biohulladékot. Ezáltal növekszik a zacskó ökohatékonyasága.

### *A biodegradálható műanyagok fejlesztése*

A **BASF** 1998-ban kezdte forgalmazni első biodegradálható poliészterét *Ecoflex* néven, amely ekkor teljesen fosszilis alapanyagokból készült. Továbbfejlesztésekor

figyelembe vették a megújuló forrásból készített műanyagok iránti érdeklődést, és az Ecoflexet politejsavval (PLA, polylactid acid) kezdték keverni. *Ecovio* márkanévvel ma különböző arányú keverékeket forgalmaznak. Az *Ecovio FS Film* márkanévű változatot kifejezetten fóliák, ill. zacskók gyártására ajánlják. Ez még több biopolimert tartalmaz, mint elődje, az *Ecovio F Film*. Az *Ecovio FS Papier* papírbevonásra, az *Ecovio FS Shrink* zsugorfóliák előállítására alkalmas. Valamennyi változat használható szerves anyagok, élelmiszerek vagy biohulladék szállítására, gyűjtésére, és lehet belőle csomagolófóliát, zacskót, hordtáskát vagy talajtakaró fóliát készíteni.

A biobázisú és a bármilyen bázisú biodegradálható műanyagok kizárólag az ipari komposztáló berendezésekben, az ott meghatározott körülmények között képesek gyorsan és tökéletesen lebomlani. A környezetben szétszórt vagy a vizekbe dobált műanyag szeméten csak úgy lehetne úrrá lenni, ha az visszakerülne egy hulladékkezelő vállalathoz, amely darabonként döntené el, hogy mekkora értéket képvisel, és mi a teendő vele. A hagyományos műanyag bevásárlótáskák általános betiltásának nincs értelme, legalábbis addig, amíg a biodegradálható zacskók általános elterjedésére és a biohulladék szervezett begyűjtésére nem alakul ki a megfelelő infrastruktúra.

A **BASF** tovább dolgozik azon, hogy biodegradálható műanyagai számára olyan alkalmazási területeket találjon, ahol a biodegradálhatóság értéktöbbletet jelent.

### *Piacbővítés és politikai keretek*

Az előrejelzések a következő években *a biodegradálható műanyagok iránti kereslet évi 20%-os növekedését jósolják*, ami négy-ötször nagyobb a szokásos műanyagokénál. Az ilyen műanyagok piaca ennek ellenére a teljes műanyagpiacnak csak egy kis része marad, mert a biodegradálható műanyagok alkalmazása csak egészen speciális esetekben célszerű.

Az EU hulladékpolitikája kedvez az ilyen speciális eseteknek, mivel erőteljesen szorgalmazza a hulladékképződés elkerülését. Az EU szakértői támogatják a komposztálás elterjedését, mert csökkenteni akarják a lerakókban elhelyezett szerves hulladék mennyiségét. *Az 1999-ben kiadott irányelvek értelmében a tagállamoknak a lerakókban elhelyezett hulladék mennyiségét 2016-ig az 1999-es mennyiség 35%-ára kellene mérsékelni.* Ennek érdekében 2007-ben minőségi követelményeket állítottak fel a komposztra, hogy növeljék annak piacát és megkönnyítsék átvételét. Ugyanilyen célból dolgoznak a biohulladékra vonatkozó törvény kidolgozásán.

Eddig még nem sikerült valamennyi komposztálót meggyőzni a biodegradálható biohulladék-gyűjtő zsákok hasznosságáról. A korábbi években minden (hagyományos) műanyag zacskó „vörös posztó” volt a beérkező biohulladékban. Egy általánosan bevezetett minősítés, az egyértelmű jelzés a kereskedők, a felhasználók és a komposztáló üzemek számára szavatolná, hogy a műanyag zacskók nem fognak gondot okozni. Ezáltal jelentősen növelni lehetne az Európában komposztált biohulladék részarányát.

Jelentős növekedés következhetne be a biohulladék hasznosításában, ha a komposztáló berendezéseket biogázt hasznosító berendezésekkel kombinálnák. Ilyesmivel Németországban, Spanyolországban és Franciaországban próbálkoznak. Míg a kom-

posztálás aerob körülményei között a mikroorganizmusok CO<sub>2</sub>-t, vizet és humuszt termelnek, az anaerob körülmények között aktív baktériumok a biohulladékból CO<sub>2</sub> mellett metánt, azaz biogázt állítanak elő. Ha egy anaerob reaktor után állítanak be egy szokásos komposztáló berendezést, kettős a haszon: a nedves vegyes háztartási hulladékból az anaerob első reaktorban képződő biogázzal áramot lehet termelni, az anaerob rothasztás maradék biomasszájából az aerob második reaktorban humuszt állítanak elő. A biodegradálható műanyagoknak tehát a jövőben mind az anaerob, mind aerob mikroorganizmusok számára táplálékforrásként kell szolgálniuk.

## A politejsav és származékainak biodegradálhatósága

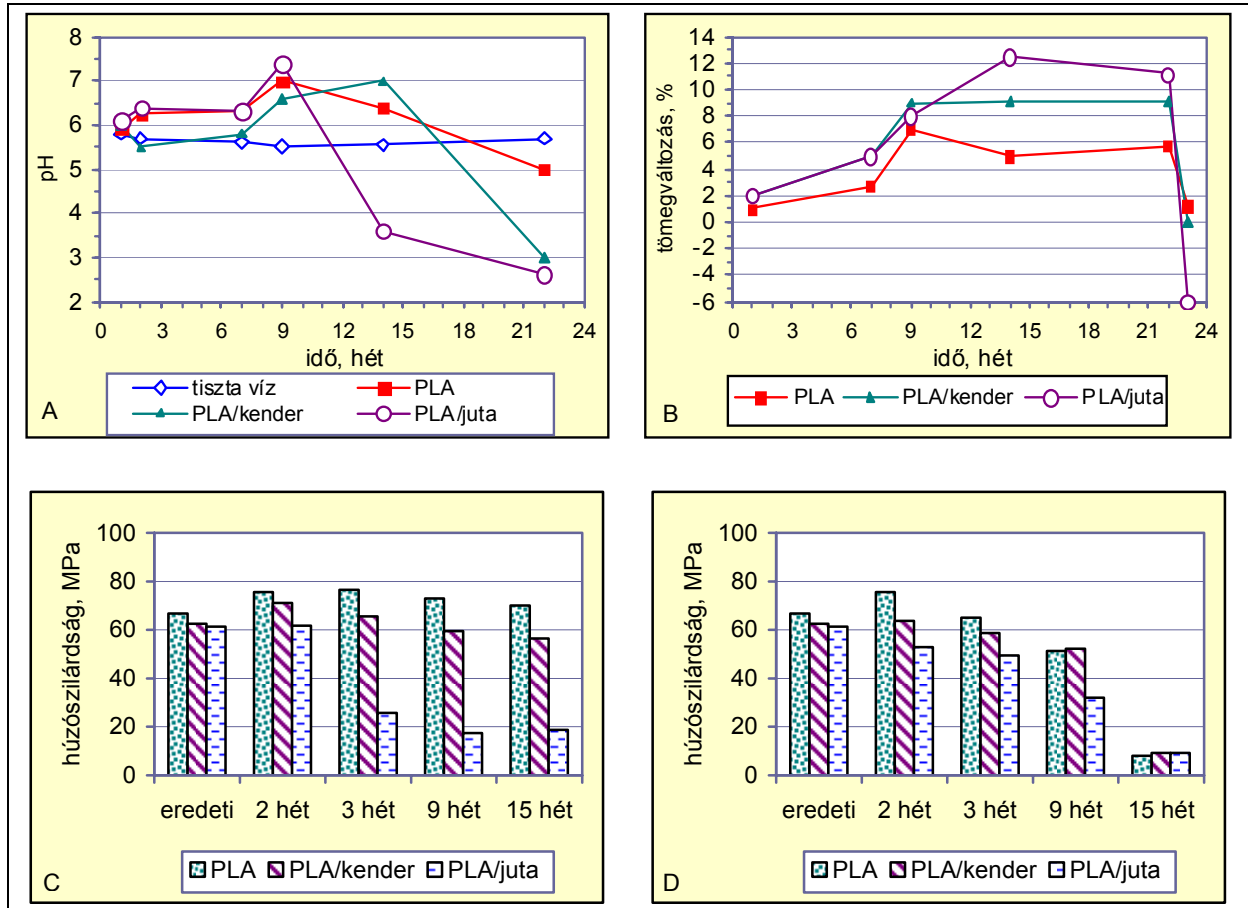
A politejsav hőre lágyuló poliészter, gyártásának alapja a fermentálás, ezért egyszerre bioműanyag és biodegradálható műanyag. Eddig ez a biopolimer volt a legsikeresebb, a világon több gyártó kínálatában szerepel. Rövid élettartamú, biodegradálható csomagolóeszközök gyártására mérsékelt, de növekedő mennyiségben már évek óta alkalmazzák. A korábbiakból kitűnik, hogy a biodegradálható csomagolóanyagok nem váltották be tökéletesen a korábbi reményeket, amelyek szerint a szabad természetben is nyom nélkül el kellene tűnniük, ehelyett csak ipari körülmények között, jól definiált paraméterek mellett bomlanak le rövid idő alatt. A PLA-nak és származékainak van azonban egy másik reményteljes alkalmazási területe: az orvostechika. Itt abban bízunk, hogy PLA-ból olyan implantátumokat tudnak majd készíteni, amelyek az élő szervezetben előre meghatározott idő alatt lebomlanak, felszívódnak vagy kiürülnek, és elsősorban a regeneratív medicinában ideiglenes implantátumok előállítására lesznek alkalmasak. Ezek átmenetileg tehermentesíthetnének pl. egy törött csontot, és mire az ismét terhelhetővé válik, a polimer egyszerűen felszívódhat, és nem kell újabb művelettel eltávolítani, mint pl. egy fémimplantátumot.

A krakkói Tudományos és Technológiai Egyetem (**University of Science and Technology**) kutatói a PLA és származékainak degradációját vizsgálták egyrészt a rövid időtartamú felhasználást (csomagolóeszközök), másrészt az élő szervezetbe épített hosszabb idejű felhasználást (implantátumok) feltételezve különböző körülmények között és különböző paraméterekkel.

### *A PLA és származékainak degradációja vízben és a komposztálás körülményei között*

A rövid időtartamú használat után keletkező hulladéktól azt várják el, hogy a természetben vagy komposztálva rövid időn belül leépüljön. Ennek vizsgálatára a kutatócsoport *Ingeo 3051D* típusú PLA-ból (Gyártja **Nature Works**) ill. ennek 5-5% kenderrosttal vagy jutarosttal erősített változatából *PN-EN ISO 527* szabvány szerinti evező alakú próbatesteket fröccsöntött. Ezek egy részét desztillált vízben 37 °C-on inkubálták, másik részét komposztáló berendezésben (*Termo-410* típusú eco-composterben) 25 hétig tartották. A polimer hidrolízisét FTIR spektrométerben követték nyomon, mérték ezenkívül a húzószilárdság változását, továbbá az inkubált minták tömegének, a víz pH-jának és vezetőképességének változását.

A biodegradálható műanyagokat természetes körülmények között erre képes baktériumtörzsek bontják le, a degradáció meglehetősen lassú, különösen alacsony hőmérsékleten. A polimer bomlásának sebességét más biodegradálható anyagok, pl. természetes szálak bekeverésével növelik, amivel többfajta baktérium számára kínálnak fel tápanyagot. A nem homogén, durva felület is gyorsítja a degradációt.



3. ábra A PLA és keverékeiből készített próbatesteket tartalmazó víz pH-jának változása (A kép), a próbatestek tömegének változása (B kép), a próbatestek húzószilárdságának változása (C kép) a 37 °C-on végzett inkubálás alatt az idő függvényében; ugyanezen próbatestek húzószilárdságának változása a komposztálás időtartamának függvényében (D kép)

A 3/A ábra mutatja a próbatesteket tartalmazó víz pH-jának változását az inkubálás időtartamának függvényében. A politejsav is, ezért nem meglepő, hogy a hidrolízis megindulása után a felszabaduló sav erőteljesen csökkentette a víz pH-ját, mégpedig a szállal erősített PLA próbatesteket tartalmazó vizét erőteljesebben, mint a tiszta PLA próbatesteket tartalmazó vizét. A víz vezetőképességének változása összhangban volt a pH változásával. Egy hét után mindhárom edényben  $\sim 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ , kilenc hét után a tiszta PLA próbatestek vizében 25,

a PLA/kender próbatetekében 27, a PLA/juta próbatetekében 55  $\mu\text{S}/\text{cm}$  vezetőképességet mértek; 22 hét után ugyanilyen sorrendben 39, 680, ill. 1520  $\mu\text{S}/\text{cm}$  volt a víz vezetőképessége. A tiszta desztillált vízé mindvégig 1–3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  körül maradt.

A próbatetek tömegváltozása a *3/B ábrán* látható. A próbatetek tömege a 9. (a PLA/juta próbateteké a 14.) hétig vízfelvétel miatt nőtt, ezután stagnált (a vízfelvétel és a hidrolízis nagyjából kiegyenlítette egymást), a 22. hét után az erőteljes hidrolízis miatt meredeken csökkent (a szállal erősített PLA-ké erősebben, mint a tiszta PLA-é).

Az infravörös (FTIR) spektrumok is igazolták a degradáció sebességének sorrendjét. A polimer fokozatos degradációját a  $1760\text{ cm}^{-1}$ -nél jelentkező C=O csoport intenzitásának erősödésével követték nyomon, amely elsősorban a  $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ ,  $1452\text{ cm}^{-1}$ ,  $1367\text{ cm}^{-1}$  és  $1386\text{ cm}^{-1}$  hullámhossznál észlelhető CH és  $\text{CH}_3$  csoportok rovására ment végbe. A PLA degradációja együtt járt a polimer kristályossági fokának növekedésével, a politejsavláncok átrendeződésével és a polimerjelleg gyengülésével.

A vízben tartott próbatetek közül a tiszta PLA húzószilárdsága (feltehetően a felvett víz lágyító hatása miatt) még 15 hét után is valamivel jobb volt a kiindulási értéknél (*3/C ábra*). A kenderrel erősített PLA húzószilárdsága átmeneti javulás után 15 hét után valamivel kisebb az eredeti értéknél. A jutát tartalmazó próbatetek szilárdsága ezzel szemben a 2. hét után erőteljesen csökkent, 15 hét után az eredeti érték harmadát sem érte el.

A komposztált próbatetek mechanikai tulajdonságai (*3/D ábra*) az első három hónapban (a jutával erősített próbatest kivételével) alig változtak, ezután indult meg az erőteljes csökkenés, és a 22. hét végén a húzószilárdság eredeti értékének töredékére csökkent.

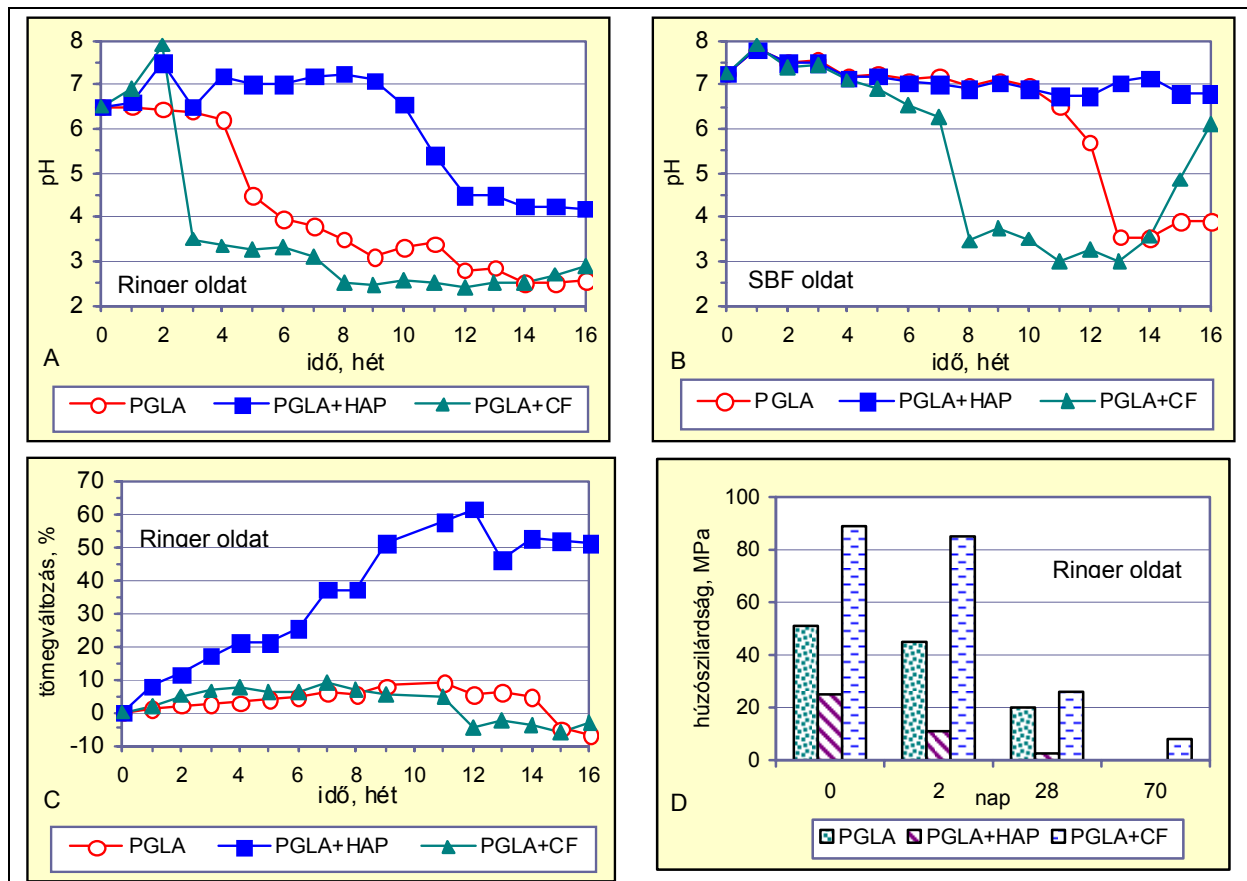
### *PLA kopolimer degradációja in vitro és in vivo kísérletekben*

Az élő szervezetben lebomló polimerek viselkedésének vizsgálatára egy 84% laktidból és 16% glikolidból felépülő poli(laktid-glikolid) kopolimert (PGLA) választottak, amelyet a lengyel **Tudományos Akadémia Polimer- és Szénanyagok Centrumában** állítottak elő. Ezt önmagában, ill. 15% szénszállal (jele PGLA+CF) vagy 15% hidroxipatittal (jele PGLA+HAP) adalékolva vizsgálták. (A természetes hidroxipatit ökörsonthól származott.) A kopolimeről és keverékeiből henger alakú próbatesteket fröccsöntöttek.

Az in vitro kísérletekben a biológiai környezet szimulálásához fiziológiás oldatot (Ringer oldat, összetétele 0,925% NaCl, 0,03% KCl, 0,025%  $\text{CaCl}_2$ , 0,02%  $\text{NaHCO}_3$ , 99% desztillált víz) és szimulált testfolyadékot (SBR, simulated body fluid, összetétele mmol/l-ben  $\text{Na}^+$  142,0;  $\text{K}^+$  5,0;  $\text{Ca}^{2+}$  2,5;  $\text{Mg}^{2+}$  1,5;  $\text{Cl}^-$  148,8;  $\text{HCO}_3^-$  4,2;  $\text{HPO}_4^{2-}$  1,0;  $\text{SO}_4^{2-}$  0,5) alkalmaztak. A mintákat ezekben az oldatokban  $37\text{ }^\circ\text{C}$ -on 16 hétig inkubálták. A heti folyadékcsere előtt mérték a próbatetek tömegét és a folyadék pH-ját.

Az in vivo kísérleteket egy erre szakosodott intézetben a **Bioetikai Testület** engedélyével új-zélandi nyulakkal végezték. A henger alakú implantátumot 3,2 mm átmérőjű méhlepénybe burkolva az állatok felső (szubmaxilláris) állcsontja alá építették be, majd 6, ill. 12 hét után távolították el.

Az in vitro kísérletekben a degradáció sebességét itt is az infravörös spektrum változásával követték. A szénszállal erősített PGLA+CF és a hidroxipatitot tartalmazó PGLA+HAP degradációja mind a fiziológiás oldatban, mind pedig a szimulált testfolyadékban gyorsabb volt, mint az adalék nélküli PGLA-é. A hidrolízis a vízfelvételt követően először az amorf fázisban indult meg, és csak később a kristályos fázisban. Az ennek nyomán képződő szabad helyek lehetővé tették a molekulák átrendeződését, emiatt nőtt a kristályossági fok. A mátrix és a szálak határfelületén a folyadék könnyebben nyomult be a kompozit belsejébe, ami meggyorsította a degradációt.



4. ábra A fiziológiás (Ringer) oldat (A kép) és a szimulált testfolyadék (SBF oldat) (B kép) pH-jának változása az idő függvényében a bennük inkubált próbatestek hatására; továbbá a Ringer oldatban kezelt próbatestek tömegének (C kép) és húzószilárdságának (D kép) változása az inkubálás időtartamának függvényében

A 4/A ábra a Ringer oldat, a 4/B ábra az SBF oldat pH-változását mutatja az inkubálás időtartamának és a próbatestek összetételének függvényében. Mindkét oldatban a PGLA+CF próbatestek hidrolízise volt a leggyorsabb. A háromféle minta közül a PGLA+HAP próbatestek folyadékában a pH-csökkenés időben késleltetve (SBF-ban alig észlelhetően) jelentkezett, amit a kutatók azzal magyaráznak, hogy a polimer degradációja, a HAP kiülepedése majd feloldódása ellensúlyozta a savasodást.

A tiszta PGLA pH-görbéje a két adalékolt polimeré között található. A bomlás sebessége a Ringer oldatban minden esetben nagyobb volt, mint az SBF oldatban.

A 4/C ábra a próbatestek tömegváltozását mutatja a Ringer oldatban. A hidrolízis következtében bekövetkező tömegvesztésüket itt 7–12 hétig ellensúlyozta vagy – a PGLA+HAP esetében – teljesen elfedte a próbatestek folyadékfelvétele. A tiszta PGLA tömegnövekedése az első 11 hét alatt kb. 10% volt, de a 16. hét végére 7,5%-os tömegvesztés következett be. A PGLA+CF tömege a 7. hét végéig kb. 7%-kal emelkedett, a 16. hét végére viszont 5%-kal volt kisebb. A PGLA+HAP próbatestek a 12. hétig 62% nedvességet vettek fel, ez a 16. hét végéig 50% körül stabilizálódott. Az SBF oldatban mért értékek görbéinek lefutása nagyon hasonló volt, a töréspontok is hasonló időtartam után jelentkeztek. A tiszta PGLA tömege 7%-os növekedés után a 16. hét végéig 25%-kal lett kevesebb, a PGLS+CF 5%-os növekedés után a kísérlet végére 10%-kal lett könnyebb. A PGLS+HAP nedvességfelvétele 48%-ig növekedett, a 16. héten ez 42%-ra mérséklődött. Ezek az eredmények bizonyítják, hogy az adalékokkal széles tartományban változtatható a degradáció sebessége.

Látványosan igazolja ezt a 4/D ábra is, amely a Ringer oldatban inkubált próbatestek húzószilárdságának változását mutatja az idő függvényében. A PGLA+HAP próbatestek szilárdsága a fiziológias oldatban már 48 óra után felére csökkent. A két másik anyagból készített próbatestek szilárdságuk jelentős részét a 4. héten veszítették el, a 10. hét után pedig az oldatnak legjobban ellenálló PGLS+CF is eredeti húzószilárdságának mindössze 10%-át őrizte meg, a másik két anyagból készített próbatest szilárdsága pedig 0-ra csökkent. A 10. héten már egyik anyag sem volna képes funkciójának megfelelni.

A nyulak szervezetébe beépített implantátumok leépülését 6 és 12 hét után infravörös spektrumuk alapján értékelték. Megállapították, hogy ezek sokkal nagyobb sebességgel bomlottak az élő szervezetben, mint az in vitro kísérletek vegyszereiben. Ennek oka, hogy az élő szervezet sokkal bonyolultabb rendszer, és olyan folyamatok is szerepet játszanak, mint a fehérjék adszorpciója, a sejtek és a szövetek reakciói, a testfolyadékok áramlása, a töltésváltozások. Emiatt a degradációs folyamatok eltérnek az in vitro kísérletekben lejátszódó folyamatoktól, legalábbis azok kinetikájától.

Kísérleteik eredményeit összefoglalva a lengyel kutatók megállapították, hogy a polilaktid és származékainak degradációs sebessége eltérő a vízben, a szintetikus fiziológiai oldatokban, mikroorganizmusok jelenlétében és az élő szervezetben. Ezért ilyen anyagok alkalmazásának már az előkísérleteiben ki kell jelölni az alkalmazási területet, a polimer szerkezetét, az esetleges módosító adalékot. Az in vitro kísérletekben mért degradációs sebességből nem lehet közvetlenül következtetni az élő szervezetben várható bomlási sebességre. A polilaktid alapú műanyagokban a hidrolízises degradáció korábban indul meg, mint a biodegradáció, és egyaránt érinti a polimer mátrixot és az adalékanyagot. Szálak adagolása gyorsítja a bomlást.

Összeállította: Pál Károlyné

Hamprecht, J.; Börger, L.; Philipp, S.: Hauptsache Bio? = Kunststoffe, 101. k. 8. sz. 2011. p. 39–43.

Chłopek, J.; Morawska-Chochół, A.; Szaraniec, B.: The influence of the environment on the degradation of polylactides and their composites = Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 43. k. 3. sz. 2010. nov. p. 72–79.