

## A PET palack és egyéb poliészter hulladékok újrafeldolgozása, újrahasznosítása

### Recycling of PET bottles and other polyester waste

**Kutasi Csaba** textilipari igazságügyi szakértő  
[kutasicsa@gmail.com](mailto:kutasicsa@gmail.com)

*Initially submitted Sept 15, 2020; accepted for publication Sept.28, 2020*

#### Abstract

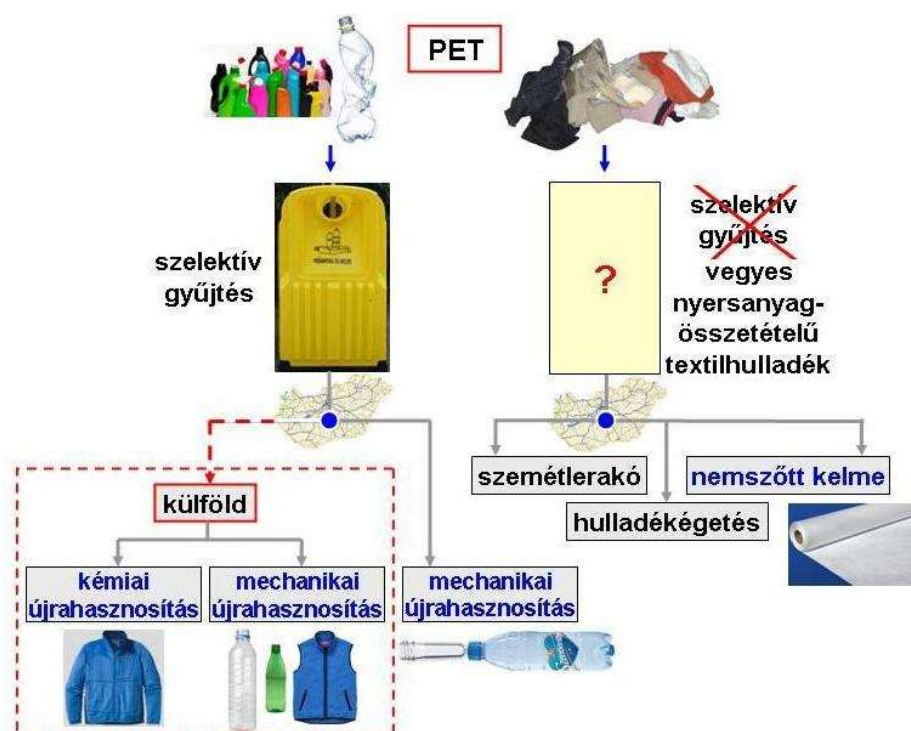
The scientific definition of polyethylene terephthalate (PET) changed for polyester in the common language. It was first manufactured in 1928 and the production of the fiber version started 1941. Nowadays, 70% of artificial textile raw materials are polyester fibers and a significant amount of plastic waste is generated at the end of the life cycle of polyester clothing and other endproducts. The injection molding process introduced in the 1970s made it possible to design and produce three-dimensional objects, and this resulted in spreading of light, transparent, resistant and non-fragile PET bottles. Given that the degradation of PET is more than 450 years, the increasing of recycling and reprocessing is an urgent pressure.

**Kulcsszavak:** Polietilén-tereftalát, polikondenzáció, polimerizáció, depolimerizáció, PET-hulladék, granulátum, regranulátum, újrahasznosítás, újrafeldolgozás

**Keywords:** Polyethylene terephthalate, Polycondensation, Polymerization, Depolymerization, PET waste, granulate, regranulate, recycling, reprocessing

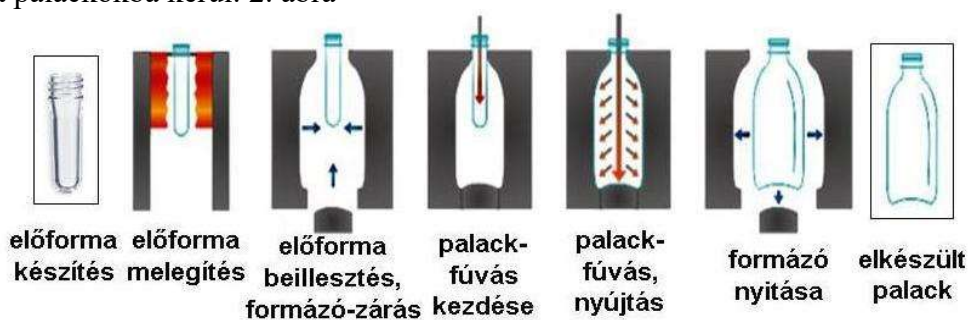
A lineáris poliészternek az előállításához évente 104 millió hordó (1 hordó kb. 159 liter) kőolajat használnak, a gyártott poliészter kb. 60%-ából textilipari szálanyag készül, mintegy 30%-ából lesz PET palack (a többi egyéb műanyag tárgy). Az összes száltermelés kb. 60-65 %-a mesterséges szál, ennek a fajtának kb. 70 %-át a poliészter teszi ki. Az újonnan előállított poliészter gyártásához jelentős mennyiségű, 125 MJ/kg energiát használnak fel, az újrahasznosított változat energiaigénye csak 66 MJ/kg. A szén-dioxid kibocsátás az alapvegyületekből történő előállításnál 9,52 CO<sub>2</sub>/kg, a másodlagos felhasználásánál 5,19 CO<sub>2</sub>/kg terheléssel jár. Minden olyan újrahasznosító eljárás összeegyeztethető a fenntartható fejlődéssel, amelynek során új alapanyagok, polimerek állíthatók elő. Ugyanígy az újrafeldolgozási lehetőségek is csökkentik a környezetterhelést.

Az anyagelemzések, degradációs modellezések szerint a PET kb. 450 év alatt bomlik le. Az új állapotú polietilén-tereftalát rendkívül ellenálló, nincs hatással az élőszervezetekre. Viszont a termelői PET hulladékkezelés nélkül, a környezetben való felhalmozódása és nagy mennyisége következtében ártalmassá válik. Hazánkban évente 1,4-1,6 milliárd db PET-palack hulladék keletkezik (a poliészter textilhulladékok szelektív gyűjtésének hiányában ennek mértéke bizonyára nem ismert), egyelőre közel 20 %-át újrahasznosítják Magyarországon, további részét részben külföldre szállítják. 1. ábra



1. ábra cím A PET jelenlegi újrahasznosítása hazánkban

Az országban működő újrahasznosító üzemben az összegyűjtött és ismételt feldolgozásnak megfelelő műanyag palackokat a bezúzás után megtisztítják, majd fröccsöntéssel regranulátumot készítenek. Ez a másodlagos granulátum a palackgyártás új alapanyagát váltja ki, amit nagyrészt külföldről szereznek be a magyar palack előállítók. Az újrahasznosított alapanyagból az előforma és majd a palack már nálunk készül, így egyes ásványvizetek, ill. szénsavas üdítők egy része a forgalmazók által előállított, újrahasznosított palackokba kerül. 2. ábra



2. ábra cím A PET palack gyártás folyamata

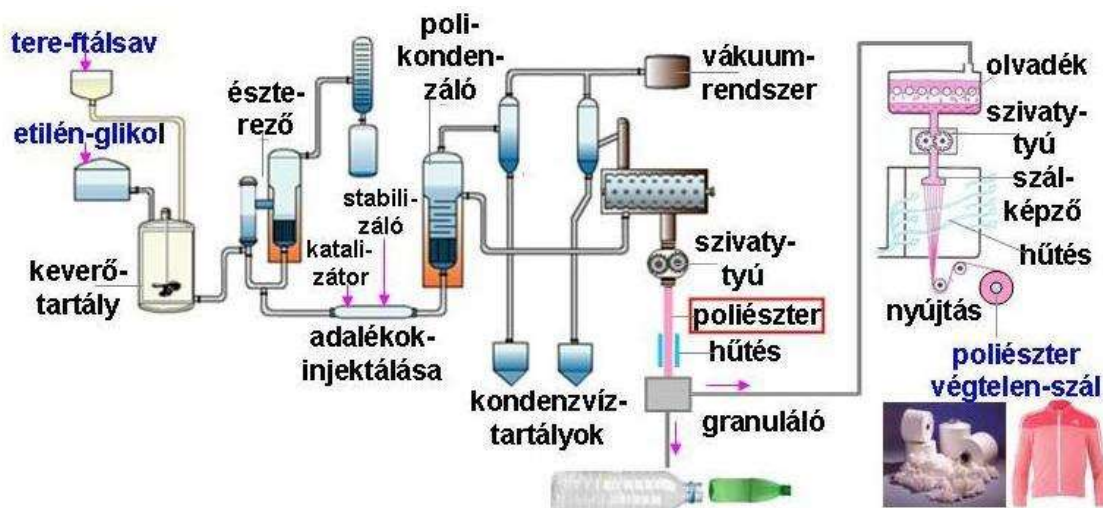
### *Az új poliészter előállítása alapvegyületekből*

A polietilén-tereftalátot tereftálsavból, pontosabban dimetil-észteréből és dietilén-glikolból állítják elő polikondenzációval. A tereftálsavat főleg a kőolajpárlatból származó p-xilolból nyerik oxidáció és észteresítés során. Az etilén-glikol etilénből (ami kőolajból, vagy a földgázból krakkolással nyerhető) készül, etilén-oxidon vagy etilén-klórhidriden keresztül képződik. Az alapvegyületekből kétlépéses polikondenzációval alakul ki a polimer. Először a tereftálsav-dimetil-észtert katalizátor jelenlétében etilén-

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

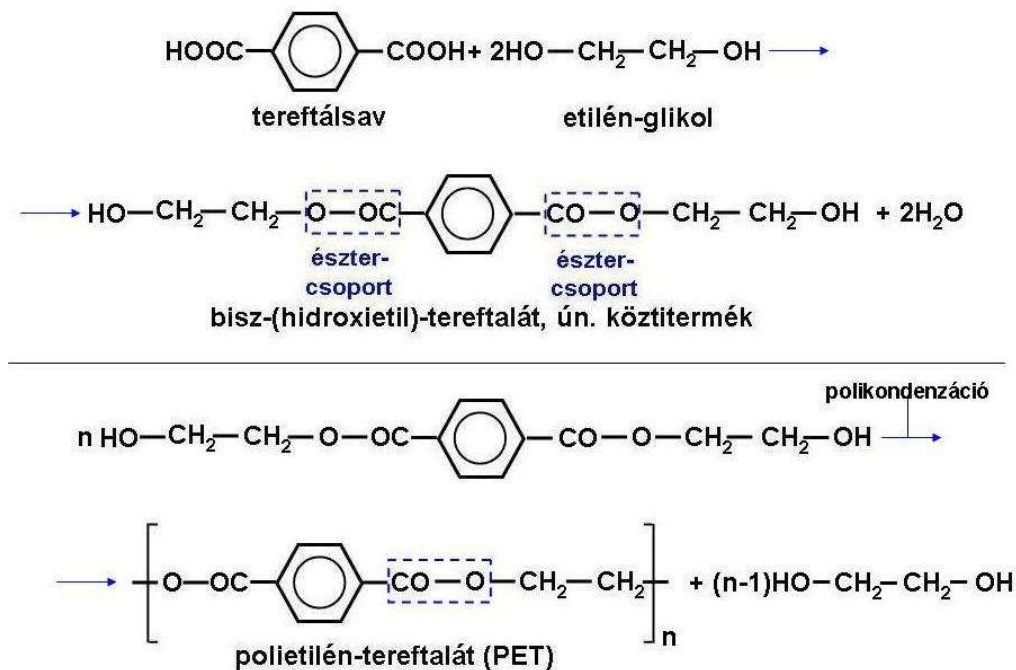
Kutasi Csaba igazságügyi szakértő

glikollal melegítik (etilén-glikolos diészter képződik). A szűrési tisztítás után, vákuumban 280 °C-on játszódik le a polikondenzációs polimerképző reakció, antimon-oxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) katalizálásával. Az így előállított polietilén-tereftalát ömledéket lehűtik és granulálják. Az ebből az ömledékből előállított, nagyobb molekulatömegű polietilén-tereftalát az ún. szilárdfázisú polimerizáció eredménye. A tiszta PET amorf polimer, de képes kristályosodni göcképzők, ill. hőkezelés hatására. A nagymolekulájú anyag 72 °C-ra melegítve a ridegből nagyrugalmasságú, kristályos fázisú szemipoláris polimerré alakul. Ilyen állapotban a láncmolekulák nyújthatók, egymás mellé rendezhetők egy- vagy két irányban. Az egyirányú orientáció alapja a textilipari szálanyag előállítása, a két irányba rendezett polimerből pedig pl. PET palack, vagy film készülhet. A szálgyártáshoz a polimert megolvastják kb. 260 °C-on, majd olvasztótárcsás berendezéssel történik a szálképzés. A végtelen, de még vastagabb ágakból álló szálfolyamot végül 100-150 %-ra nyújtják. 3. ábra



3. ábra cím Az új előállítású poliészter képzése

A közvetlen kőolajból (vagy részben földgázból) történő PET előállítás jelentős szénhidrogén- és energiaigénnyel terheli az eleve túlterhelést mutató földi erőforrás kapacitási rendszert. Az energiagazdálkodással kapcsolatban kiemelendő, hogy az újrahasznosított polietilén-tereftalátban rejlő, ún. rezervált energiatartalom hasznosítása is lényeges forrás. Egy kilogramm poliészterben annyi energia raktározódik, amely közel nyolc és fél liter átlagos oktánszámú benzín üzemanyag energiatartalmával egyenértékű. 4. ábra



4. ábra cím A PET típusú poliészter előállításának kémiája

A polietilén-tereftalát szerkezetű poliészter textilipari újrahasznosítása egyelőre nem terjedt el olyan mértékben, mint amit a megnövekedett hulladékmennyiség elvileg lehetővé tenné. A PET anyagú eszközök, tárgyak és textilipari termékek jelentős mennyiségben kínálnak újra felhasználható alapanyagot. Meghatározó bázist képeznek az ásványvizes- és üdítőitalos palackok, melyekből – a jól szervezett szelektív hulladékgyűjtés ellenére – még nagyon sok kerül a szeméttelpekre, hulladékegyesítőbe. Így komoly környezeti probléma és anyagi veszteség okozói a nem hasznosuló és nem biodegradálható palackok (továbbá a textilhulladékok).

#### *Az újrahasznosítás forrásai, lehetőségei*

Az újrahasznosított polietilén-tereftalát alapanyagok többféle forrása ismert. A világon a legfőbb alapanyagbázist a szelektív palackgyűjtés, ill. a használt poliészter alapanyagú, hulladékká vált használt textilanyagok begyűjtése képezi. Utóbbit a fogyasztói forgalomból származó, újrafelhasználható PCRPET-nek (Post Consumer Recycled PET) nevezik. A jelentős mennyiségű forrást képező, textiliparból származó poliészter a PIRPET (Post Industrial Recycled PET), amelyek a kelmeképző- és kikészítőüzemekben keletkező hulladékvágatokból, valamint a konfekcionáló vállalkozásoknál képződő szabászati hulladékból származnak. Az összegyűjtött PET hulladékból (palack, textília) mechanikus és kémiai eljárással képezhető újrahasznosuló anyag. A mechanikus módszer egyszerű, miután az aprított nyers PET-ből, hőkezelés után készítenek újrahasznosuló műanyagot. Ezzel az energiakímélő eljárással (csak az aprítási és hevítési művelet igényel energiát) viszont nem állíthatók elő minden-irányú felhasználásra alkalmas homogén szálanyagok (főleg az idegen- és szennyezőanyagok előfordulása miatt). A kémiai alapú újrahasznosító eljárások közül kiemelendő az ún. PETRETEC-eljárás. Ennek során a hulladék polietilén-tereftalátot tereftálsav-dimetil-észterre (DMT – dimetiltereftalát, a tereftálsav és a metanol észtere) és etilén-glikol monomerekké alakítják. A PET-ből lebontással tereftálsav-dimetil-észter alakul. Az etilén-glikol izolálása nehezebb, de megoldható feladat.

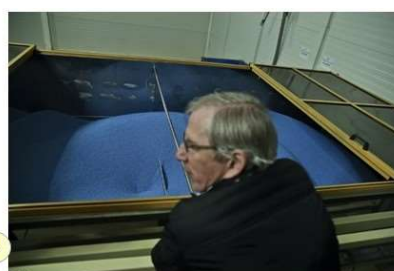
### *Mechanikai újrahasznosítás*

Az aprítás során különböző méretű, alakzatú és vastagságú részek keletkeznek. A palack falrészéből 0,5 mm-nél vékonyabb, lemez jellegű darabkák képződnek, ezek 65-70 %-ot tesznek ki. A talp- és nyakrészéből általában 1 mm-nél vastagabb, tömörebb részecskék nyerhetők, arányuk 30-35 %-os. Ugyanakkor számolni kell az átmenetet képező részecskék elfordulásával is. Amennyiben az újrahasznosítási folyamatba a különböző hulladék-részek vegyesen kerülnek be, úgy a visszanyert anyagot ingadozó minőség jellemzi. Az optimális minőség érdekében szükséges olyan ipari méreteken megbízható osztályozási technika biztosítása, amely a vastagság és alakzat szerinti elkülönítést lehetővé teszi. A szétválasztás hatékonysága a részecskék mozgásától függ, amit az áramlásnál fellépő, a hulladék-aprítékra ható ellenállás-erők befolyásolnak. Főleg a lemez jellegű részecskék áthaladása kritikus az osztályozótérben, eltérő helyzetük és különböző légellenállásuk miatt. Ennek következtében az azonos jellemzőkkel rendelkező részecskék is eltérően süllyedhetnek, szemben a vastagabb és tömörebb hulladék-részek mozgásával.

Az elválasztási módszerek közül a pneumatikus fluidizáció, ill. az ún. cikcakk-szeperator került előtérbe. A tapasztalatok alapján utóbbival érik el a részecskék élesváltású besorolását, különös tekintettel az átmeneti darabkák viselkedésére. Ezek a fluidizációs eljárás során a lemezszerű csoportba kerültek, a cikcakk-szeperatorban történő szétválasztásnál a tömörebb részecskéknek megfelelő frakcióban válnak ki, ami a feldolgozás szempontjából kedvezőbb.

A felaprított szilárd hulladék olvasztását főleg az egy irányba forgó kétcsigás extruderekben végzik, az olvadátkban előforduló légnemű anyagok (gázok és gőzök) maradéktalan eltávolítása többlépcsős folyamat eredménye (így a szárítás is elkerülhető). A polimer-olvadék szűrésénél lényeges az állandó nyomás fenntartása, csak így oldható meg a hatékony tisztítás. Egyidejűleg több szűrőegység működik, ezekben a szűrőelemek rozsdamentes acélhuzalból készült szitaszövetek optimális aktív felülettel. Az adott üzemszatórnában a szennyeződéssel telített polimerolvadék visszaáramoltatható - miközben a többi egység végzi a hatékony szűrést -, majd a tiszta szűrővel rendelkező csatorna ismét munkába áll.

Az ún. primer újrafeldolgozásnál a tisztított és felaprított PET hulladékot részben hozzákeverik az alapvegyületből készítenő polimerhez. A szekunder hasznosításnál a kellően előkészített anyagból extruderen képeznek újrafelhasználható műanyagot, ami granulálás után alkalmas feldolgozásra. Ugyanakkor az így feldolgozott polietilén-tereftalát minősége romlik, molekulatömege valamelyest csökken (a polimert felépítő láncmolekulák részleges szakadása miatt). 5./a és /b. ábra

1  
PET palack válogatás, tisztítás2  
bálázás3  
aprítás darálással4  
regranulátum-képzés5  
regranulátum6  
előforma-készítés palack készítéshez

5. ábra cím A PET palack újrafeldolozása Karcagon

### Kémiai újrahasznosítás

A terciér feldolgozásnak is nevezett módszernél a PET-et felépítő láncmolekulák kisebb egységekké, ill. akár monomerekké bomlanak le, szolvólízissel (az oldószer végzi a lebontást), vagy pirolízis (a műanyag levegőtől elzárt hevítése) útján.

A PET hulladék újra-feldolgozhatóságát nagyban befolyásolja annak szennyezettsége, a szennyezőanyagok kémiai hovatartozása, bomlása. Pl. a polivinil-acetátból ecetsav, a polivinil-kloridból sósav szabadul fel, a savas vegyületek pedig a láncmolekulák részleges szakadását, a molekulatömeg

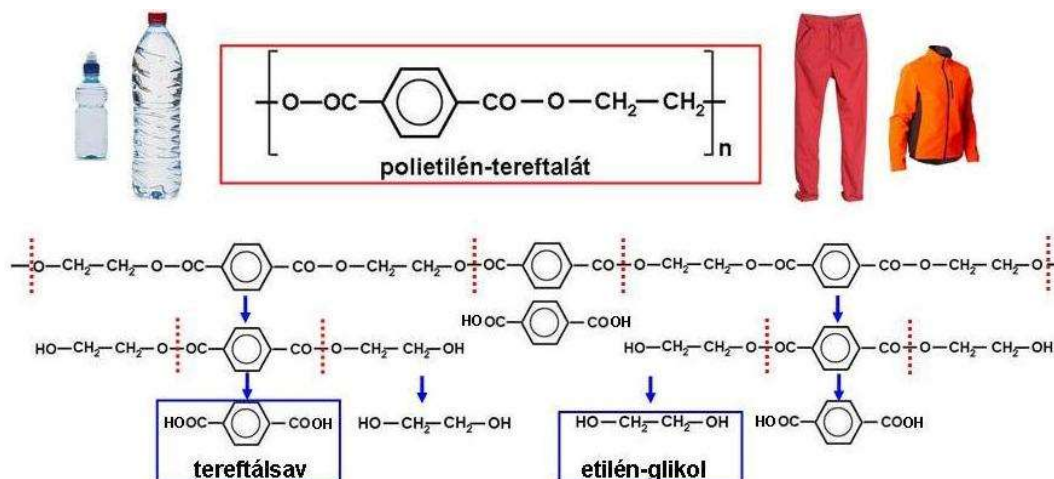
<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

Kutasi Csaba igazságügyi szakértő

csökkenését okozzák, szilárdságsökkenést előidézve. Pl. a palackokon előforduló nyomtatott fóliák színezőanyaga szintén zavaró tényező, ezért is fontos a tökéletes válogatás és előkészítés.

A PET kémiai újrahasznosításának lényege a - már említett - szolvólízis, aminek során a polimerláncban levő észter-kötéseket megbontják, ehhez különböző oldószerek (víz, sav, alkoholok, esetleg aminok) alkalmasak. A hidrolízises lebontás történhet semleges, savas, ill. lúgos közegben. Az ammonolízis (koncentrált ammóniával), a metanolízis (metanollal) szintén alkalmas a láncmolekulák leépítésére, monomerré bontására. A glikolízissel végzett degradáció esetében különböző glikolokat (etilén-glikol, dietilén-glikol, propilén-glikol, dipropilén-glikol) használnak, a lebontás katalitikus, oldószeres, szuperkritikus (az etilén-glikol szuperkritikus hőmérséklete és nyomása felett) és mikrohullámú (a sugárzás biztosítja a fűtési energiát) körülmények között végezhető.

A nem teljes lebontásig végzett glikolízissel ún. poliészter-poliolok képződnek, ezek többek között a poliuretán nyerésre, műgyanták, ill. textil-lágyítók előállítására használhatók. A szálgyártásnál keletkező rossz minőségű termékek, poliészter hulladékok nem használhatók fel újra a szálképzési folyamatban, ezekből is poliészter-poliolokat készítenek. A megfelelő minőségű hulladék-anyagból célirányosan kialakított depolimerizációs reakcióval a teljes lebontás megvalósítható, a kialakított alapvegyületekből lehet szintetizálni a polietilén-tereftalátot. 6. ábra



6. ábra cím A PET depolimerizációja a kémiai újrahasznosítás során

### A textilipari újrahasznosítás helyzete

A poliészter hulladékok (szál- és kelmegyártási maradványok, ruhaipari szabászati belső hulladékok; életciklus végét követően összegyűjtött ruházati és egyéb textiltermékek) aránylag egyszerűbb hasznosítására nyílik lehetőség a nemszőtt-kelmék (törlőkendők, szűrőkelmék, geotextíliák, töltőanyagok, egyszer használatos egészségügyi textíliák stb.) gyártásánál. Ezek egyik típusa többrétegű szálfátyolból felépülő szálbundából készül. A lapszerű textilanyagú hulladékot ún. farkasoló-tépőgépen szálakra bontják szét, majd a fonodákban használatos kártológépeken közel párhuzamos helyzetű szálakból álló fátlyat képeznek. Ezeket több rétegben keresztezve egymásra helyezik, így alakul ki a szálbunda. Megoldást jelenthet az is, hogy az önálló elemi szálakat légáramlat segítségével továbbítják egy szállítószalagra vagy egy perforált szívódob felületére, a leválasztott szálréteg alkotja a bunda alapanyagot.

A készülő textilfelületen belüli szálak között kötőanyaggal vagy hőkezeléssel (olvasztás-szerű lágyítással) érik el a szilárdítást a vegyi módszer esetén. A mechanikus szilárdítás a szálak közötti súrlódás fokozásával történik. Pl. a tűnemezelés során nagyszámú speciális kialakítású fogazott (szakállas) tű szúrnak keresztül a szálrétegen, amelyek a visszahúzásnál szálakat/pásmákat húznak magukkal, vastagság irányban tömörítve a szálrendszert. A mechanikus szilárdítás másik módszere a vízsugaras kuszálas. Ennek során vékony, nagy nyomású vízsugarakat bocsátanak a textilrétegre, így a szálak vastagság irányban kuszáldva tömörítik, szilárdítják a nemszőtt-kelme-t. 7. ábra



7. ábra cím Mechanikus szilárdítású nemszőtt-kelme képzés

A kémiailag újrahasznosított polietilén-tereftalát mechanikai tulajdonságai egyrészt kedvezőbbek, a szál felépítő anyag átlagos molekulatömeg nagyobb, fokozottabb a szívósság (mint a dinamikai igénybevételekkel szembeni ellenállás), ugyanakkor alacsonyabb a rugalmassági modulus (az a fajlagos húzóerő, amely szükséges lenne a szál hosszának megkétszerezéséhez) értéke.

A kémiailag újrahasznosított PET szálak esetében néhány tényező azonban még gátolja az új előállítású szálakkal való egyenértékűséget:

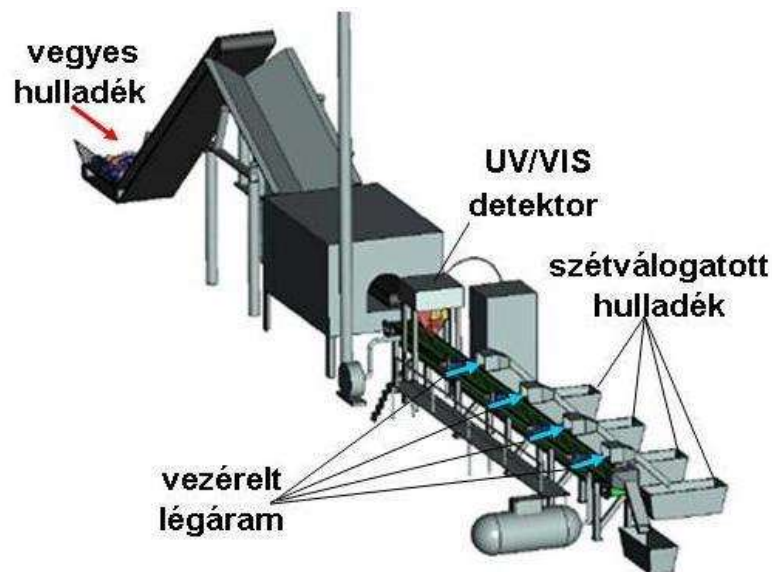
- A szálak alapszíne az újrahasznosított változatnál enyhén krém elszíneződésű, így fehér és élénk színezetű termékek gyártása nehézkes.
- A szálak színezésénél eltérések fordulnak elő, az újrahasznosított alapanyag nehezebben színezhető, több színezék, víz és energia szükséges adott színezet eléréséhez.
- A másodlagos feldolgozású poliészter szál nem jelent korlátlan felhasználhatóságot, finom textíliák előállítását még nem teszi lehetővé. Ezért pl. polár-termékek, egyen- és munkaruha-alapanyagok, speciális hálós bélések céljára alkalmazzák. Gyakori az alapvegyületekből kiinduló PET szálak gyártása során, a hulladékból kémiai újrahasznosítással visszanyert monomerek bekeverése. Az egyes műszaki textíliákhoz (pl. hálók, kisebb igényű kompozit-erősítő vázanyagok stb.) is felhasználható az újrahasznosított PET-ből készült szálanyag.

*A műanyag hulladékok szétválasztása*

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

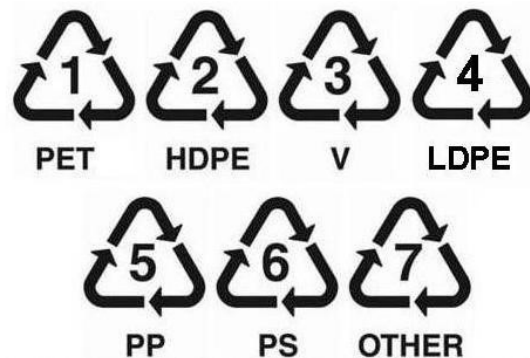
Kutasi Csaba igazságügyi szakértő

A sikeres újrahasznosítás előtt általában gondot okoz, hogy a hulladékban többféle műanyag van jelen. A külsőképi elven alapuló kézi válogatással pl. alak és szín szerint - esetleg azonosító jelzések figyelésével - azonosíthatók az egyes anyagfajták (pl. PET palack), textiltermékeknél a szalagcímkén feltüntetett nyersanyag-összetétel alapján. Ismertek automatizált azonosító eljárások is. A hulladék aprítása utáni szitálás során az elválasztásra módot ad a sűrűség szerinti osztályozódás a levegőáramban. Komplex spektrofotometriás elosztási technológiák is rendelkezésre állnak [UV/VIS (ultraibolya-látható tartományú spektroszkópia), NIR (közelinfravörös spektroszkópia), lézer, stb.]. 8. ábra



8. ábra cím Automata műanyag hulladék osztályozó rendszer

A különböző hulladék-anyagok, csomagolóeszközök újrahasznosíthatóságát több módon jelölik a világon. A leggyakoribb, Európában egységesen használt a három egymásra mutató stilizált nyíl jellegű embléma, számmal a közepén, és/vagy betűkkel alatta. Ezt a jelölési rendszert nem terjesztették ki minden anyag típusra, pl. a szálerősítésű kompozitokra sincs vonatkozó jelzés. 9. ábra



- 1 - PET vagy PETE - polietilén-tereftalát  
 2 - HDPE - nagy sűrűségű polietilén  
 3 - PVC - polivinil-klorid  
 4 - LDPE - kis sűrűségű polietilén  
 5 - PP - polipropilén  
 6 - PS - polisztirol  
 7 - vagy 0 - egyéb újrahasznosítható anyag
9. ábra cím Néhány újrahasznosítható anyag jelölése

### *A közvetlen pusztító műanyag hulladék*

2018 februárjában vetett partra a víz egy fiatal nagy ámbráscet tetemét Spanyolország déli partvidékén. A kutatók kiderítették, mi végzett a hatalmas állattal. A boncolás során a szakértők csaknem 29 kg műanyag hulladékot szedtek ki az elpusztult cet gyomrából és beleiből. A csaknem 10 méter hosszú állatból kioperált szemét között voltak műanyag zacskók, kötél- és üvegdarabok, valamint flakonok. Az állat tápcsatornájában maradt idegenanyagok okozták a végzetes hasúri fertőzést (peritonitis). 10. ábra



**hasúri fertőzés miatt elpusztult fiatal ámbráscet teteme**



**29 kg műanyag volt a cet gyomrában és beleiben**

10. ábra cím Példa a pusztító műanyag hulladéokra

Befejezésül - egy a számos - bíztató törekvés közül a tengerbe került műanyag hulladékok kezelésére. Yvan Bourgnon 2016 szeptemberében hozta létre a The SeaCleaners nevű szervezetet a tengeri műanyag hulladék begyűjtésére, feldolgozására. Az innovatív - mintegy üzemenként is működő - vízijármű, a Manta nevű quadrimarán a tervek szerint 70 méter hosszú, 49 méter széles és 61 méter magas lesz. A hajó hibrid hajtóműrendszere szél- és napenergiára, valamint a Dyna-Rigg nevű vitorlarendszere (a forgó oszlopok modern szögletes vitorlafelülete zárt szélfogórendszert képez) épül. Naponta csaknem tíz tonna

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

Kutasi Csaba igazságügyi szakértő

műanyag szemét begyűjtésére és feldolgozására lesz képes, ami egy nagyjából 25 napos misszió esetén 250 tonna hulladék begyűjtést és feldolgozást jelent.

**Felhasznált irodalom:**

[1] MÁTHÉ Csabáné dr.: PET palackok újrahasznosítása, Műanyagipari szemle (Műanyagok és a környezet) 2007/1 <https://quattroplast.hu/muanyagipariszemle/2007/01/pet-palackok-ujrahasznositasa-15.pdf> *(nincs oldalszám az elérhetőségen)*

[2] BUGYI Orsolya: Polietilén-tereftalát kémiai újrahasznosítása, és az új, értéknövelt termékek jellemzése, BME Fizikai Kémia és Anyagtudományok Tanszék, Műanyag- és Gumiipari Laboratórium, Budapest 2005. 9-23. oldal

[3] [https://plattinfo.spglobal.com/Register-Recycled-Plastics.html?gclid=Cj0KCQjwnueFBhChARIsAPu3YkRP\\_KdR0kjujF23gsIdWrpJF0q33QZaDEWIZffkJVN06utMyr5-XYaAlxFEALw\\_wcB](https://plattinfo.spglobal.com/Register-Recycled-Plastics.html?gclid=Cj0KCQjwnueFBhChARIsAPu3YkRP_KdR0kjujF23gsIdWrpJF0q33QZaDEWIZffkJVN06utMyr5-XYaAlxFEALw_wcB)

[4] [https://www.msp-emmen.com/pet-yarn?gclid=Cj0KCQjwnueFBhChARIsAPu3YkSq5FSflnq5NXq5j4p7AucQzFuSWeRakBSG5P-aqv5OgUOLM3pCpsaAnCTEALw\\_wcB](https://www.msp-emmen.com/pet-yarn?gclid=Cj0KCQjwnueFBhChARIsAPu3YkSq5FSflnq5NXq5j4p7AucQzFuSWeRakBSG5P-aqv5OgUOLM3pCpsaAnCTEALw_wcB)